

2020

## Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT

Ronald Estiven Rios Hernández  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_automatizacion](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion)



Part of the [Environmental Engineering Commons](#)

---

### Citación recomendada

Rios Hernández, R. E. (2020). Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_automatizacion/772](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion/772)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería en Automatización by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).



# Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT.

Ronald Estiven Rios Hernández

Universidad de La Salle Colombia  
Facultad de ingeniería, Programa de Ingeniería en Automatización  
Bogotá, Colombia  
Año 2020

# Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT.

**Ronald Estiven Rios Hernández**

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero en Automatización**

Director:  
Dr.-Ing.Efrain Bernal A.

Línea de Investigación:  
Innovación y tecnología, Ambiente y Sustentabilidad  
Grupo de Investigación:  
AVARC

Universidad de La Salle Colombia  
Facultad de ingeniería, Programa de Ingeniería en Automatización  
Bogotá, Colombia  
Año 2020

## Dedicatoria

El producto de alcanzar una meta es el resultado de luchar por cada uno de los sueños que se trazan en el camino, ser un gran ingeniero en automatización es el mío, comprometido a la investigación e innovación de nuevas tecnologías en el medio ambiente y una ciudad sustentable.

El trabajo de grado es dedicado a cada una de las personas que han confiado en mis capacidades, primeramente Dios por ser mi fuerza incondicional y resiliencia, mis padres que cada uno de sus esfuerzos espero recompensar en este largo camino de la vida y poder brindarles alegrías, mis compañeros ,amigos y mi novia que en este largo camino aprendimos lo maravilloso de la amistad, el trabajo en grupo y el amor, al ingeniero Efraín Bernal por su ayuda y apoyo en mi proceso de llegar a ser ingeniero, a cada uno de los ingenieros que me aportó su conocimiento y su talento humano para lograr esta meta, la Universidad de La Salle por abrirnos las puertas de esta excelente institución que día a día se convertí en un hogar,el programa ser pilo paga, el expresidente Juan Manuel Santos Calderón por brindar la oportunidad de superacion a miles de jóvenes y creer que el futuro de Colombia es una sociedad en paz y educada.



# Resumen

La contaminación del aire es uno de los grandes desafíos ambientales de la salud pública, este hecho no se presenta solo en los países con grandes producciones y alto desarrollo económico, hoy en día se ha convertido en un problema dentro del país, en las principales ciudades. La contaminación del aire tiene efectos adversos en la salud humana y en el entorno, las emisiones de los gases tóxicos por parte de las fuentes fijas y móviles tales como industrias y vehículos respectivamente son una de las principales causas de enfermedades cardio-respiratorias.

Actualmente en el país se realizan planes de mitigación para reducir el impacto de la contaminación del aire en las principales ciudades, donde se están tomando medidas a partir del monitoreo del material particulado PM2.5, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de carbono, temperatura, humedad y presión del aire.

Con el objetivo de monitorear los gases más perjudiciales y nocivos para la salud según la organización internacional EPA( monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y material particulado PM 2.5) se diseño e implemento un módulo para el monitoreo de la calidad del aire, para el cual fue necesario, el desarrollo de una red IoT, diseño de tarjetas de acondicionamiento de señales para los sensores escogidos, adquisición de datos correspondiente a los valores monitoreados por los sensores, envió de estos datos de calidad del aire a un sistema de información para su almacenamiento y visualización.

**Palabras clave:( Monitoreo, Calidad del Aire, Gases nocivos para la salud, red IoT, adquisición de datos, sistema de información).**

# Abstract

Air pollution is one of the great environmental control and public health challenges, this fact does not occur only in countries with large productions and development, nowadays it has become a problem within our country in the main cities Air pollution has adverse effects on human health and the environment, emissions of toxic gases by industries, concentration of harmful gases, particles in the environment and vehicle emissions.

Plans are currently being made in the country to mitigate the impact of air quality in the main cities, where measures are being taken from the monitoring of PM2.5 particulate material, carbon monoxide, nitrogen dioxide, carbon dioxide , temperature, humidity and air pressure.

In order to monitor the most harmful and harmful gases according to EPA (carbon monoxide, nitrogen dioxide and particulate matter PM 2.5), a prototype is proposed for monitoring air quality, for the prototype it is necessary, the development of an IoT network, design of signal conditioning cards for the chosen sensors, perform the acquisition of data corresponding to the values monitored by the sensors, take this air quality data to an information system for storage and visualization .

**Keywords:** (Monitoring, air quality, gases harmful to health, IoT network, data acquisition, information system)

# Contenido

<b>Dedicatoria</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Monitoreo de la contaminación del aire . . . . .	2
1.1.1. Air Quality Monitoring System Based on IoT using Raspberry Pi . .	2
1.1.2. An IoT based low cost air pollution monitoring system . . . . .	2
1.1.3. Edge Computing Based IoT Architecture for Low Cost Air Pollution Monitoring Systems: A Comprehensive System Analysis, Design Con- siderations & Development . . . . .	3
1.1.4. Low cost pollution control and air quality monitoring system using Raspberry Pi for Internet of Things. . . . .	3
1.1.5. Laboratorio ambiental móvil para mediciones de la calidad del aire en tiempo real. . . . .	4
1.2. Resumen normativo . . . . .	5
1.2.1. Indices de calidad del aire y los efectos de la mala calidad del aire en la salud humana. . . . .	6
1.3. Internet Of Things . . . . .	7
1.3.1. Características IoT. . . . .	7
1.3.2. Arquitectura IoT . . . . .	7
<b>2. Sistemas de adquisición y comunicación de datos</b>	<b>10</b>
2.1. Selección de instrumentación para el módulo de calidad del aire . . . . .	10
2.1.1. RTC DS1307 . . . . .	15
2.1.2. MicroSD . . . . .	15
2.1.3. Conversor de nivel lógico . . . . .	16
2.1.4. DC-DC Step-Down 3A LM2596 . . . . .	16
2.1.5. E32-TTL-100. . . . .	17
2.1.6. ARDUINO . . . . .	18
2.1.7. Raspberry Pi . . . . .	19
2.2. Diseño electrónico de integración módulo de calidad del aire. . . . .	21
2.3. Adquisición de datos y programación del microcontrolador . . . . .	30

<b>3. Integración nodos de monitoreo a red IoT de calidad del aire.</b>	<b>34</b>
3.1. Comunicación módulos calidad del aire y Raspberry . . . . .	34
3.1.1. LoRaWAN . . . . .	34
3.1.2. EBYTE 433MHz conexión con arduino . . . . .	35
3.2. Conexión Red IoT con servicio web y aplicación de monitoreo de calidad del aire. . . . .	37
3.2.1. Ubidots . . . . .	37
<b>4. Calibración y lectura de sensores</b>	<b>48</b>
<b>5. Resultados</b>	<b>52</b>
5.1. Monitoreo calidad del aire para contaminante PM 2.5 y PM 10 . . . . .	60
5.2. Monitoreo calidad del aire contaminante monóxido de Carbono . . . . .	63
5.3. Monitoreo calidad del aire para contaminante dióxido de nitrógeno . . . . .	66
5.4. Influencia de la temperatura y humedad relativa en la calidad del aire . . . . .	68
5.5. Validación módulo de calidad del aire . . . . .	70
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>75</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	75
6.2. Recomendaciones . . . . .	76
<b>A. Anexo: Datasheet sensores de medición de contaminantes del aire</b>	<b>78</b>
<b>B. Anexo: Configuración del sistema de información web con raspberry pi.</b>	<b>82</b>
<b>C. Anexo: Datos de validación calidad del aire módulo vs RMCAB Kennedy</b>	<b>85</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>88</b>

# Lista de terminos

Abreviatura	Término
<i>PM</i> <sub>2,5</sub>	Material particulado 2.5 micras
<i>PM</i> <sub>10</sub>	Material particulado 10 micras
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>NO</i> <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
<i>H</i> <sub>2</sub> <i>S</i>	Dióxido de azufre
<i>ICA</i>	Indice de Calidad del Aire
<i>EPA</i>	Environmental Protection Agency
<i>RM</i> <i>CAB</i>	Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá
<i>RMSE</i>	root mean square error
<i>NAAQS</i>	National Ambient Air Quality Standards
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>ppm</i>	Partes por millon
<i>ppb</i>	Partes por billon
<i>WE</i>	Electrodo de trabajo
<i>AE</i>	Electrodo de Auxiliar
<i>WET</i>	Electrodo cero de trabajo
<i>AET</i>	Electrodo cero Auxiliar
<i>ST</i>	Sensibilidad sensores
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board
<i>API</i>	Application Programming Interface
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>mV</i>	Milivoltios
<i>nA</i>	Nanoamperios

# 1. Introducción

La calidad del aire es una de las medidas clave que se desean monitorear en tiempo real en entornos urbanos, que tiene impacto en la salud humana. En el caso de Colombia, los parámetros de calidad del aire se establecen en la resolución 2254 de 2017, la cual contempla los niveles adecuados de la calidad del aire para el bienestar de la población, así mismo la fijación de niveles que garanticen la protección de la salud y el bienestar humano.

Aunque esta información está restringida a ambientes exteriores, la mayoría de las mediciones son estáticas y solo obtienen valores promedio; sin embargo, en tiempo real, la calidad del aire es variable y puede verse afectada por diversos factores, por ejemplo, la velocidad del viento, la densidad de población, la distribución de contaminantes y si la ubicación es en interiores o exteriores. Convencionalmente, las estaciones de control de la contaminación del aire son de gran tamaño, costosas para la instalación y el mantenimiento. [11].

Se buscan alternativas más rentables con mejores tecnologías, claramente una de ellas es la implementación de las IoT, reduciendo así costos, también combinando la tecnología con sensorica de precisión acercándose a la normativa de calibración de los sensores planteados por EPA, implementando un sistema de monitoreo a bajo costo, preciso y fácil de usar.

Se han planteado objetivos para los cuales es necesario la investigación de los sensores más adecuados para medir la contaminación del aire, teniendo en cuenta los gases más nocivos para la salud y los presentes en la ciudad de Bogotá, diseñar e implementar un prototipo de red de sensores IoT para la medición de gases nocivos y material particulado que afectan la calidad del aire y la salud de las personas, para lograr este objetivo general es necesario la adquisición, procesamiento y comunicación de los datos para así llevar esta información a la capa de aplicación donde se supervisaran y analizaran, integrando a la red iot dos nodos de monitoreo de calidad del aire. La metodología se realizó en 4 fases: La primera fase comprendió la revisión bibliográfica y del estado del arte, correspondiente al tema de sistemas de calidad del aire a bajo costo, para la segunda fase la selección de la instrumentación necesaria para el módulo y el desarrollo de la red IoT, en su tercera fase se realizó la integración de los datos con un servicio web tipo IoT para la recopilación de la información y visualización de los datos, en la cuarta y última fase la integración de los módulos desarrollados y se procede a la validación experimental del módulo.

## **1.1. Monitoreo de la contaminación del aire**

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha identificado seis contaminantes criterio como contaminantes de preocupación debido a sus impactos en la salud y el medio ambiente. Los contaminantes criterio son ozono (O<sub>3</sub>), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y plomo (Pb). Bajo la Ley de Aire Limpio, la EPA ha establecido Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental primarios y secundarios (NAAQS) para estos seis contaminantes.

Los estándares primarios están diseñados para proteger la salud pública, especialmente las poblaciones sensibles, mientras que los estándares secundarios están diseñados para proteger el bienestar público que incluye el medio ambiente. Si un área geográfica no cumple con uno o más de los NAAQS, se designa como un área de no cumplimiento y debe diseñar un plan para cumplir con el estándar.[23].

### **1.1.1. Air Quality Monitoring System Based on IoT using Raspberry Pi**

En el trabajo realizado por [13] en la conferencia International Conference on Computing, Communication and Automation donde se hace énfasis en uno de los más grandes desafíos ambientales del mundo el cual es la contaminación de la calidad del aire que produce efectos adversos en la salud humana, el clima y en los ecosistemas, el aire se contamina debido a la emisión de gases tóxicos por parte de las industrias, las emisiones vehiculares y el aumento de la concentración de gases nocivos y partículas en la atmósfera. El material particulado es uno de los parámetros más importantes que tienen una contribución significativa al aumento de la contaminación del aire. Esto crea una necesidad de medición y análisis del monitoreo de la calidad del aire en tiempo real para que las decisiones apropiadas se puedan tomar en un período oportuno. Ellos presentan en este artículo un sistema de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real que incluye varios parámetros: PM 2.5, monóxido de carbono, dióxido de carbono, temperatura, humedad y presión del aire. Internet de las cosas hoy en día está encontrando un uso profundo en todos y cada uno de los sectores, también desempeña un papel clave en el sistema de monitoreo de la calidad del aire. El Internet de las cosas que converge con la computación en la nube, ofrece una técnica novedosa para una mejor gestión de los datos provenientes de diferentes sensores, recopilados y transmitidos por una minicomputadora basada en ARM de bajo consumo y bajo costo, la Raspberry pi.

### **1.1.2. An IoT based low cost air pollution monitoring system**

[8] Plantearon un prototipo para un Sistema de Monitoreo de la Contaminación del Aire Ambiental para monitorear las concentraciones de los principales gases contaminantes del

aire. El sistema utiliza nodos de monitoreo de calidad del aire de bajo costo que incluyen un sensor de gas semiconductor de bajo costo con módulos Wi-Fi. Este sistema mide las concentraciones de gases tales como CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> mediante el uso de sensores semiconductores. Los sensores recopilaron los datos de varios parámetros ambientales y los proporcionan a la frambuesa pi que actúa como una estación base. La realización de los datos recopilados por los sensores se muestra en el servidor web basado en Raspberry pi 3.

### **1.1.3. Edge Computing Based IoT Architecture for Low Cost Air Pollution Monitoring Systems: A Comprehensive System Analysis, Design Considerations & Development**

Con el rápido crecimiento del comercio y el transporte en la civilización moderna, se ha prestado mucha atención al monitoreo de la calidad del aire, sin embargo, los sistemas de monitoreo existentes no pueden proporcionar suficientes resoluciones espaciales y temporales de los datos con soluciones rentables y en tiempo real. En este documento, se ha investigado los problemas, la infraestructura, la complejidad computacional y los procedimientos para diseñar e implementar sistemas de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real. Para aturdir los defectos de los sistemas de monitoreo existentes y disminuir el costo general, este documento ideó un enfoque novedoso para implementar el sistema de monitoreo de la calidad del aire, empleando el Internet-of-Things (IoT) basado en la computación de borde. En el método propuesto, los sensores recopilan los datos de calidad del aire en tiempo real y los transmiten al dispositivo informático de borde que realiza el procesamiento y análisis necesarios. La infraestructura completa y el prototipo para evaluación se desarrollan sobre la placa Arduino y la plataforma IBM Watson IoT. Un modelo estructurado de tal manera que reduce la carga computacional sobre los nodos de detección (reducido al 70 %) que funciona con baterías y lo equilibra con el dispositivo informático de borde que tiene su base de datos local. Se emplearon algoritmos para evitar errores temporales en sensores de bajo costo y para manejar problemas de sensibilidad cruzada. La calibración automática se configura para garantizar la precisión de los informes de los sensores, logrando así una precisión de los datos de alrededor del 80 % en diferentes circunstancias. Además, se aplica una estrategia de transmisión de datos para minimizar el tráfico de red redundante y el consumo de energía. El modelo adquiere una reducción del consumo de energía de hasta un 23 % con un bajo costo significativo. [11]

### **1.1.4. Low cost pollution control and air quality monitoring system using Raspberry Pi for Internet of Things.**

En un enfoque innovador para conectar varios dispositivos a través de Internet y usar dicha interconexión para implementar funciones altamente beneficiosas. IoT es sin duda uno de los temas más investigados y continuará configurando el enfoque que adoptamos para resolver



problemas en los próximos años. En el documento, se propuso un sistema basado en la IoT para combatir la contaminación del aire, lo cual es especialmente preocupante en un país densamente poblado, por ejemplo, la India. Se utiliza un sistema integrado para conectar varios sensores que recopilan datos sobre el entorno circundante. Sobre la base de los datos obtenidos, se presenta un algoritmo de predicción para implementar proactivamente una solución a cualquier problema encontrado. Los datos recopilados se almacenan en una base de datos MySQL que puede consultarse siempre que se requiera la información relevante. Este modelo analizaría los datos y los reportaría a los usuarios. Los resultados obtenidos se evalúan utilizando la plataforma de IoT de datos abiertos ThinkSpeak con análisis de datos. Una de las principales ventajas del sistema propuesto es su rentabilidad. Junto con su naturaleza escalable, dinámica y flexible, este modelo se puede configurar y desplegar fácilmente en cualquier área para monitorear y controlar la calidad de su entorno. [12]

#### **1.1.5. Laboratorio ambiental móvil para mediciones de la calidad del aire en tiempo real.**

La universidad EAN en conjunto con la compañía de autos Mitsubishi implementaron el primer laboratorio ambiental móvil para la calidad del aire de Latinoamérica, el cual logra medir temperatura, CO<sub>2</sub>, material matriculado y NOX, en tiempo real para luego enviar estas métricas a un servidor y realizar el tratamiento de datos.

El laboratorio arrojó en sus primeros resultados una alta contaminación auditiva y ambiental en el sector conocido como Avenida Chile, el distrito financiero de Colombia, donde hay una concentración de CO<sub>2</sub>, más alta de lo que habitualmente se espera.

La EAN indicó que en vista de que en el año 2050 el 85 % de las personas en Colombia habitará en las ciudades, esta iniciativa será un valioso insumo a la hora de reducir los índices de contaminación metropolitana, que ya hoy ha generado varias alertas.[7]

## 1.2. Resumen normativo

Resumen Normativo para la calidad del aire en Colombia		
Año	Documento	Resumen
2006	Decreto 174 de 2006 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.	Adopta medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire en el Distrito Capital, por material particulado menor o igual a 10 micras (PM10). Ordena al DAMA la adopción de medidas pertinentes para reducir los niveles de contaminación y establece una restricción vehicular. Ordena al IDU, a la Secretaría de Obras Públicas y a la EAAB incluir el criterio ambiental, para priorizar la ejecución de las obras de infraestructura relacionadas con la malla vial y de acueducto y alcantarillado de la ciudad, en las zonas clasificadas como áreas-fuente de contaminación alta, antes determinadas.
2006	Resolución 601 de 2006 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, en la cual se desarrollan los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia y las medidas generales para su mitigación.
2010	Resolución 610 de 2010 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Modifica la Resolución 601 de 2006 por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, respecto de algunas definiciones, los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos, procedimientos de medición de la calidad del aire, mediciones de calidad del aire por las autoridades ambientales, declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire.
2015	Resolución Conjunta 2410 de 2015 Secretaría Distrital de Ambiente.	Adopta el índice Bogotano de Calidad del Aire IBOCA para la definición de niveles de prevención, alerta o emergencia por contaminación atmosférica en Bogotá; el cual operará como indicador para la gestión y articulación de las acciones conjuntas entre los sectores de ambiente y salud. Establece definiciones, rangos de emisión; cálculo, pronóstico, zonificación; crea la Mesa Permanente del índice Bogotano de Calidad del Aire IBOCA; implementación de la estrategia pedagógica de recomendaciones en salud y mantenimiento o mejora de la calidad del aire por parte de las Secretarías Distritales de Ambiente y Salud.
2017	Resolución 2254 de 2017 Ministerio de medio ambiente.	Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional para garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana.

**Tabla 1-1.:** Resumen Normativo para la calidad del aire en Colombia (Autor).

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) publicó la Resolución 2254 de 2017, hablando que a través de las normas a seguir para el monitoreo de calidad del aire como parte de la estrategia del gobierno nacional para proteger la salud de los colombianos. La Resolución 2254 de 2017 consagra el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano y el deber del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente, planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales a fin de garantizar el desarrollo sostenible, la conservación, restauración o sustitución y prevenir los factores de deterioro ambiental.

Esta norma fija niveles máximos permisibles más estrictos para los contaminantes criterios, en el fortalecimiento de la medición de calidad del aire, lo cual es necesario dentro del territorio nacional según datos de Departamento Nacional de Planeación (DNP), los costos por la contaminación del aire urbano representan un 1,93% del Producto Interno Bruto (PIB) del 2015. Esta polución está asociada a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades.

### 1.2.1. Índices de calidad del aire y los efectos de la mala calidad del aire en la salud humana.

La contaminación del aire se basa en la mezcla compleja de diferentes compuestos químicos en forma de partículas sólidas, gotas diminutas de líquidos o gases, algunos de estos contaminantes son de corta duración en caso contrario hay algunos de larga duración es decir años.

La exposición a altos niveles de contaminación del aire puede causar una variedad de resultados adversos a la salud. La contaminación del aire puede aumentar el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón. Los contaminantes más nocivos para la salud, estrechamente asociados con la mortalidad prematura excesiva, son partículas finas PM<sub>2,5</sub> que penetran profundamente en los conductos pulmonares.[18].

Air Quality Index Levels of Health Concern	Numerical Value	Meaning
Good	0 to 50	Air quality is considered satisfactory, and air pollution poses little or no risk.
Moderate	51 to 100	Air quality is acceptable; however, for some pollutants there may be a moderate health concern for a very small number of people who are unusually sensitive to air pollution.
Unhealthy for Sensitive Groups	101 to 150	Members of sensitive groups may experience health effects. The general public is not likely to be affected.
Unhealthy	151 to 200	Everyone may begin to experience health effects; members of sensitive groups may experience more serious health effects.
Very Unhealthy	201 to 300	Health warnings of emergency conditions. The entire population is more likely to be affected.
Hazardous	301 to 500	Health alert: everyone may experience more serious health effects.

**Figura 1-1.:** Índices de calidad del aire según la OMS.[18]

## 1.3. Internet Of Things

Es la interconexión digital de dispositivos inteligentes enlazados junto con internet, está conformado por múltiples y diversas tecnologías como sensores, los cuales extraen la información de datos del mundo físico y los digitaliza, equipos inteligentes como los PC, Smartphone permiten procesar la información extraída y llevarlas a plataformas donde es posible el almacenamiento, procesamiento y supervisión de los datos. Las redes inteligentes han permitido un avance al futuro donde es posible obtener mejores resultados en las operaciones industriales, aumento en la seguridad de producción y protección industrial. La comunicación de los objetos inteligentes entre ellos e internet es fundamental, por tanto se ha implementado diversas tecnologías siendo una de las más adaptada a los IoT la tecnología inalámbrica, donde cobra importancia las redes de sensores inalámbricos (WSN) permitiendo escalabilidad del IoT y realizando una integración de la arquitectura junto con internet.

### 1.3.1. Características IoT.

- Interconectividad:  
Esta es la característica que dota al IoT de todo su potencial, ya que permite la compatibilidad y el acceso a la infraestructura mundial de la información y la comunicación.
- Servicios relacionados con objetos:  
IoT proporciona servicios relacionados con objetos dentro de las restricciones de esos objetos.
- Heterogeneidad:  
Dispositivos basados en diferentes plataformas hardware y redes que pueden interactuar entre sí.
- Cambios dinámicos:  
Tanto el estado de los dispositivos (reposo, activo, conectado, desconectado) como el contexto (ubicación, velocidad) o el número de dispositivos pueden variar de forma dinámica.
- Escalabilidad:  
El número de dispositivos IoT interconectados va a incrementarse espectacularmente durante los próximos años, lo que hará necesaria la gestión de datos generados, su interpretación y su manipulación de forma eficiente.[6]

### 1.3.2. Arquitectura IoT

Se divide especialmente en 4 capas de las cuales se hablara brevemente.



**Figura 1-2.:** Arquitectura IoT.[15]

■ **Capa de dispositivos:**

Es la base de la arquitectura, relacionada fundamentalmente con el medio físico en el cual se encuentra el dispositivo, cuenta con las siguientes funciones:

- **Sensar:**  
Permite obtener datos del medio físico, estos datos pueden ser, por ejemplo, temperatura, presión atmosférica, un vídeo, o un sonido.
- **Actuar:**  
La ejecución de acciones sobre el medio físico, realizando actividades de control sobre los actuadores.
- **Generar peticiones:**  
En la realización de peticiones esta la solicitud de ejecución de una acción, solicitar un dato a la nube o solicitud de entrar en modo de ahorro de energía.
- **Enviar reportes:**  
Los dispositivos de manera automática están programados para el envío de datos, una vez completadas las tareas de muestreo o fallas dentro del sistema.

■ **Puntos de Acceso:**

Los puntos de acceso permiten la conectividad de la capa de dispositivos a internet, es fundamental establecer conexión entre los periféricos y la nube, también debe permitir la conexión entre ellos. Esta conexión tiene que ser redundante, ya que con la información obtenida de los dispositivos, se pueda gestionar la información.

A través de interfaces de comunicación los dispositivos están conectados entre si y con la nube. Existen muchos protocolos u tecnologías de comunicación como lo son ZigBee, Wifi, MQTT, Bluetooth, con diferentes tecnologías para comunicarse con servidores u objetos, los puntos de acceso deben ser capaces de entender y procesar los sistemas y funcionar como pasarela, haciéndolos compatibles.

- **Procesamiento de datos:**

Es la base del IoT los datos, el funcionamiento de un sistema con estas características depende de las capacidades en la gestión de estos datos y el uso inteligente que se haga de ellos. Un sistema de IoT debe ser capaz de recolectar información de los sensores, almacenarlos y analizarlos. En este punto las plataformas en la nube enfocadas a este sector tienen el procesamiento de los datos y el análisis de los mismos. Además, deben ser capaces con los datos analizados lanzar alertas basadas en reglas. Ejemplo de un sensor capaz de medir una magnitud física y enviar la información a través de un protocolo a algún centro de procesamiento de datos.

- **Capa de aplicación:**

Supervisión y análisis de la información, es necesario de aplicaciones que sean amigables para el ser humano. Da lo mismo si son nativas o web. Gracias al uso de APIs y servicios web, cualquier tipo de aplicación se podrá conectar a los datos y mostrarlos a los usuarios, no solo visualizar los datos, estas aplicaciones tienen la capacidad de modificar los parámetros para que los sistemas se comporten de una manera determinada.

## **2. Sistemas de adquisición y comunicación de datos**

A lo largo del capítulo se observará los requisitos técnicos de selección de los sensores para el monitoreo de la calidad del aire y demás componentes del módulo, seguidamente la forma en la cual se realizó la adquisición de los datos al microcontrolador, el procesamiento de datos en el microcontrolador, implementación de los módulos de comunicación para el diseño de la red IoT y el diseño de la PCB para el módulo, explorando las diferentes herramientas para el diseño de estas tarjetas.

### **2.1. Selección de instrumentación para el módulo de calidad del aire**

La selección de los contaminantes a monitorear se escogió bajo dos normativas, principalmente bajo la normativa EPA, La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha identificado seis contaminantes criterio como contaminantes de preocupación debido a sus impactos en la salud y el medio ambiente. Los contaminantes criterios son ozono (O<sub>3</sub>), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y plomo (Pb). Bajo la Ley de Aire Limpio, la EPA ha establecido Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental primarios y secundarios (NAAQS) para estos seis contaminantes.[1]

La segunda en cuanto a la normativa colombiana la resolución 2254 de 2017 establece los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio: material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y monóxido de carbono (CO), basados en el protocolo de sistemas de vigilancia de calidad del aire se establece el tipo de equipo para la medición de calidad del aire (Indicativo, Básico, Intermedio y Avanzado), en los equipos básico intermedios y avanzado es necesario principalmente cumplir con el monitoreo de material particulado, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, donde estas estaciones deben determinar la calidad del aire y las concentraciones de estos contaminantes primarios, para una estación de monitoreo intermedia es necesario la medición de material particulado CO y NO<sub>2</sub> o material particulado y ozono. Por tanto, en pro de diseñar un sistema que cumpla con los parámetros del sistema de vigilancia de calidad del aire se seleccionaron los contaminantes primarios a monitorear: Material particulado, monóxido de carbono y dióxido

de nitrógeno, basados en la normativa y las afecciones de estos contaminantes en la salud humana.

En la selección de los sensores de CO (Monóxido de carbono), NO<sub>2</sub>(Dióxido de nitrógeno), y PM 2.5 se tuvo en cuenta los límites de detección ya sea en ppb o ppm, el rango de detección del sensor, los más aproximados a cumplir con la normativa de EPA, cabe resaltar que ninguno de los sensores aquí mencionados cumplen con esta certificación, el costo de los sensores certificados en relación calidad, necesidad, y precio es muy alto aproximadamente entre 5000-20000 USD por sensor.

- Definición de la aplicación.

En el presente proyecto, los sensores para la medición de la calidad del aire como una estación estática ya sea indoor o a la intemperie, ubicada idealmente entre 1.5m y 2m del suelo, el módulo está contenido en un rack de protección IP 66.

- Tipo de alimentación del módulo.

La alimentación se realiza a través de fuentes de 24VDC o 12VDC, el módulo cuenta con un regulador de voltaje a 5V para la alimentación de los sensores, microcontrolador y demás elementos electrónicos.

- Tipo de entradas (Análoga o digital).

Los sensores de CO y NO<sub>2</sub> tienen dos entradas análogas por sensor con un rango de 4 a 20mA, el sensor de PM 2.5 cuenta con comunicación UART, el sensor de temperatura y humedad relativa trabajan con una entrada digital.

- Características físicas de trabajo del módulo de calidad del aire.

El módulo trabaja tanto en condiciones indoor como en exteriores por tanto los sensores tienen un rango de temperatura entre los 10 C° y 50 C° para el óptimo funcionamiento del equipo, internamente el equipo debe ser protegido de la humedad y el polvo ya que los sensores trabajan a la intemperie.



Especificación de sensores					
Referencia	Tipo de contaminante	Rango de detección	Temperatura de operación (Grados centígrados)	Porcentaje de error	Costo del mercado
MQ 7	Monóxido de carbono	20ppm-2000ppm	-20 a 50	30 %	18.000
Alphasense COB4	Monóxido de carbono	20ppb-1000ppm	-20 a 50	8-15 %	560.000
Alphasense COA4	Monóxido de carbono	20ppb-1000ppm	-20 a 50	8-15 %	494.000
Alphasense NO2B4	Dióxido de Nitrógeno	0.5ppb-50ppm	-20 a 50	8-15 %	560.000
Alphasense NO2A4	Dióxido de Nitrógeno	0.5ppb-50ppm	-20 a 50	8-15 %	494.000
HPMA115S0	Material Particulado (2.5 y 10)	$\frac{15\mu g}{m^3}$ to $\frac{1000\mu g}{m^3}$	-20 a 50	5 %	62.000
PMS5003	Material Particulado (2.5 y 10)	$\frac{100\mu g}{m^3}$ to $\frac{500\mu g}{m^3}$	10 a 60	5 %	58.000
DH11	Temperatura y humedad relativa		-55 a 150	2 %	12.000
LM35	Temperatura		0 a 50	5 %	4.000

**Tabla 2-1.:** Especificación de sensores de calidad del aire según especificaciones técnicas y costo de mercado (Autor).

Como se puede observar en la tabla **2-1** el mercado ofrece variedad en los sensores para la medición de calidad del aire, como se observó anteriormente en los pasos de selección de un sensor hay varios factores que se tuvieron en cuenta en la selección como lo son el rango de operación, temperatura de operación, costo y la aplicación en la cual van a ser empleados los sensores, teniendo en cuenta estos parámetros se escogieron:

Selección de sensores					
Referencia	Variable a medir	Rango de detección	Temperatura de operación C°	Resolución	Tiempo de respuesta
Alphasense COB4	Monóxido de carbono	2ppb-1000ppm	-20 a 50	420-650 nA/ppm	25s
Alphasense NO2B4	Dióxido de Nitrógeno	0.5ppb-50ppm	-20 a 50	-200-650 nA/ppm	60s
HPMA115S0	Material Particulado (2.5 y 10)	$\frac{15\mu g}{m^3}$ to $\frac{1000\mu g}{m^3}$	-20 a 50	$\frac{1\mu g}{m^3}$	6s
DHT11	Temperatura y humedad relativa	0-50C°	0-50C°	1 C°	6-15s

**Tabla 2-2.:** Sensores de calidad del aire seleccionados (Autor).

- Alphasense COB4 y NO2B4.

Para monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno respectivamente, debido a la resolución de trabajo, rango de trabajo, temperatura de operación y tiempo de respuesta, la sensibilidad a la temperatura es posible modificarla a través de la resistencia de operación de las tarjetas de acondicionamiento que viene en kit con el sensor, a diferencia de la referencia de Alphasense COA4 y NO2A4 estos sensores son de uso para exteriores e interiores, en cuanto a costo la relación calidad- precio es alta con respecto a los sensores MQ 7, estos sensores de Alphasense han sido utilizados en diferentes proyectos de la Unión Europea para la medición de calidad del aire en diferentes ciudades de Europa, arrojando una alta confiabilidad de los datos tomados con respecto a equipos certificados.

El sensor de gas tóxico Alphasense utiliza células electroquímicas para detectar cambios amperométricos, es decir, cambios en la corriente que pasa por el sensor. El cambio de corriente es linealmente proporcional a un cambio volumétrico en el gas presente. Hay tres electrodos en el sensor, dos de notable importancia; el electrodo de trabajo (WE), el electrodo de referencia o auxiliar (AE). El contraelectrodo trata de equilibrar la reacción del WE, y producirá otros compuestos como el H<sub>2</sub>O o el CO<sub>2</sub> en una reacción que complementa la reacción del WE. El contraelectrodo no está conectado a las salidas de los sensores, y su voltaje/corriente no es de notable preocupación. El electrodo auxiliar (AE), sin embargo, es importante. El circuito y la célula electroquímica del AE son idénticos a los del WE, pero el AE está cerrado al aire para ser usado como una referencia y control para el electrodo de WE.

Los sensores son susceptibles a los campos electromagnéticos, y las consideraciones de diseño del fabricante sugieren usar un blindaje alrededor de los sensores para un resultado más estable en las mediciones. Sin embargo, los sensores contienen líquidos dentro del dispositivo para la reacción química, y son sensibles al movimiento. Al exponer los sensores al gas, se debe asegurar que el flujo de aire, si lo hay, no sea directamente normal o perpendicular a la malla del sensor, sino que corra paralelo a la malla.



**Figura 2-1.:** Sensor de Monóxido de carbono. [2]



**Figura 2-2.:** Sensor de Dióxido de nitrógeno.[2]

- HPM115S0 PM 2.5 PM10

El rango de trabajo hace que las mediciones y la resolución del sensor sean más efectivas en la toma de los datos del material particulador, el rango de temperatura de operación es más efectivo a la hora de trabajar en climas con temperaturas bajo cero, el costo es relativamente bajo y de altas prestaciones, maneja una comunicación UART lo que hace sencilla su comunicación con los microcontroladores.

## Honeywell



Figura 2-3.: Sensor de Material Particulado.[10]

### 2.1.1. RTC DS1307

Para el módulo de calidad del aire es necesario contar con un reloj de real time RTC 1307. Es un circuito electrónico especializado cuya función es mantener la hora y fecha actual en un sistema informático (ya sea con microcontrolador u otro tipo de CPU). Se caracteriza por tener un bajo consumo de energía y también normalmente su propia fuente de alimentación auxiliar. Al recurrir a este tipo de circuitos integrados es de esperar que se obtenga una mejor precisión en la cuenta del tiempo.[9]

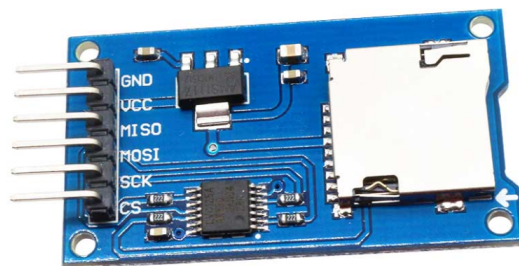


Figura 2-4.: Real time DS1307.[9]

### 2.1.2. MicroSD

Módulo SD para datalogger, en caso de caída o pérdida de la red IoT, el módulo cuenta con un sistema de respaldo de información en el cual los datos se almacenan en una tarjeta microSD donde los datos tomados de los sensores junto con la hora de la toma del dato, son

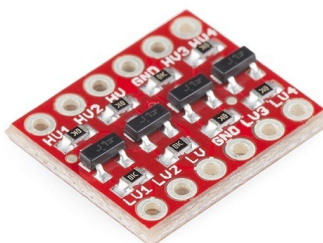
guardados como un archivo de texto .txt, estos módulos trabajan a 5V y son dispositivos portátiles.[16]



**Figura 2-5.:** Módulo de lectura MicroSD.[16]

### 2.1.3. Conversor de nivel lógico

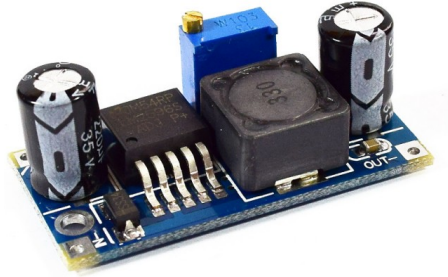
El convertor de nivel lógico es necesario para la comunicación UART de HPMA115S0 el cual tiene un suministro de alimentación de 5V pero utiliza una lógica de 3,3 voltios. El convertidor de nivel también funciona con dispositivos de 2,8V y 1,8V. Este convertidor de nivel lógico tiene como ventaja que se puede definir cual va a ser el nivel de voltaje desde y hacia el que se quiere convertir y esto lo puede hacer a través de los pines definidos HV y LV en la placa. Después de establecer estos niveles de voltaje puede convertir hasta 4 pines entre los respectivos niveles.[21]



**Figura 2-6.:** Conversor de voltajes de nivel lógico.[21]

### 2.1.4. DC-DC Step-Down 3A LM2596

El convertidor de voltaje DC-DC Step-Down 3A LM2596 tiene como función entregar un voltaje de salida constante inferior al voltaje de entrada frente a variaciones del voltaje de entrada o de carga. Soporta corrientes de salida de hasta 3A, voltaje de entrada entre 4.5V a 40V y voltaje de salida entre 1.23V a 37V. El voltaje de salida se selecciona mediante un potenciómetro multivuelta, en el módulo de calidad del aire el voltaje de salida al sistema es de 5V.[17]



**Figura 2-7.:** Conversor reductor de voltaje BUCK.[17]

### 2.1.5. E32-TTL-100.

Es un módulo transcriptor inalámbrico de 100 mW con tecnología LoRa de amplio espectro, opera entre 410 y 441 MHz (predeterminado: 433 MHz), basado en RFIC SX1278 original importado de SEMTECH, transmisión transparente disponible, nivel TTL. El módulo adopta la tecnología de espectro extendido LoRa, lo que significa que la distancia de transmisión es mucho más larga que antes. Las ventajas de este módulo son una densidad de potencia más concentrada y un mejor rendimiento antiinterferencias. El módulo tiene la función de encriptación y compresión de datos. Los datos del módulo transmitido en el aire presentan aleatoriedad. Con el cifrado y descifrado rigurosos, la interceptación de datos se vuelve inútil. La función de compresión de datos puede disminuir el tiempo de transmisión y la probabilidad de ser interferida la comunicación, al tiempo que mejora la confiabilidad y la eficiencia de transmisión.[4]



**Figura 2-8.:** Módulo de comunicación RF E32-TTL-100. [4]

Componentes electrónicos					
Referencia	Voltaje de operación	Frecuencia de trabajo	Temperatura de operación C°	Rango	Parámetros específicos
DS1307	4.5-5.5V	100kHz	-40-80C°	56-byte	8bits
LM2596	1.23-35Vdc	150kHz	-40-85C°	0.1-2A	92
DC-DC					eficiente %
E32	2.3-5.2Vdc	433mHz	-40-85C°	10-3000m	envió de
TTL100					100 pa- quetes en 30bytes cada 2 segundos

**Tabla 2-3.:** Componentes electrónicos módulo de calidad del aire (Autor).

### 2.1.6. ARDUINO

Arduino es conocido como una plataforma de desarrollo de código abierto, la cual se basa en hardware y software libre, la plataforma comercializa diferentes tipos de mircoordenadores, Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla.[24] El Arduino Nano es una pequeña y completa placa basada en el ATmega328 (Arduino Nano 3.0) o el ATmega168 en sus versiones anteriores (Arduino Nano 2.x) que se usa conectándola a una protoboard.[24]

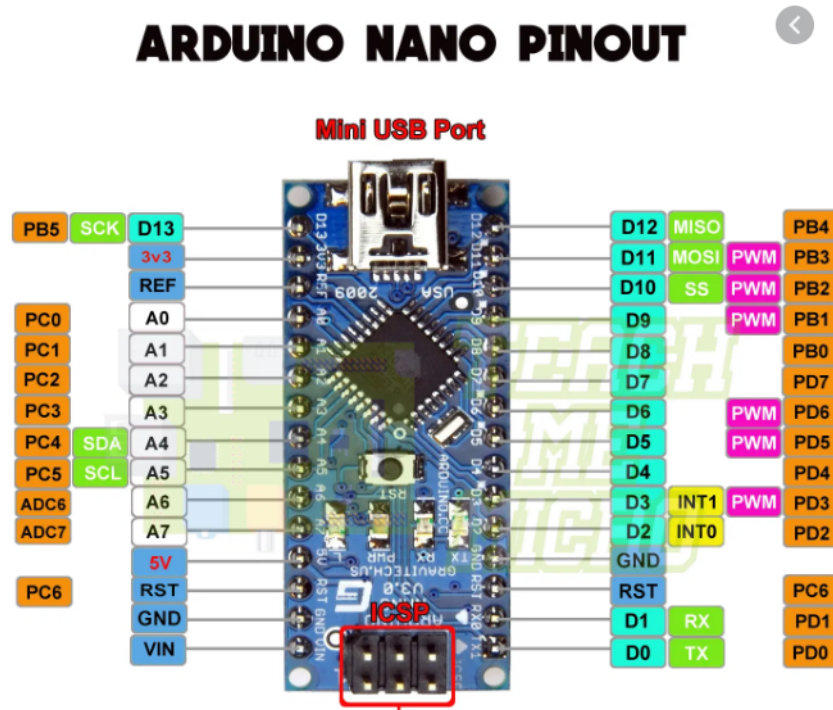
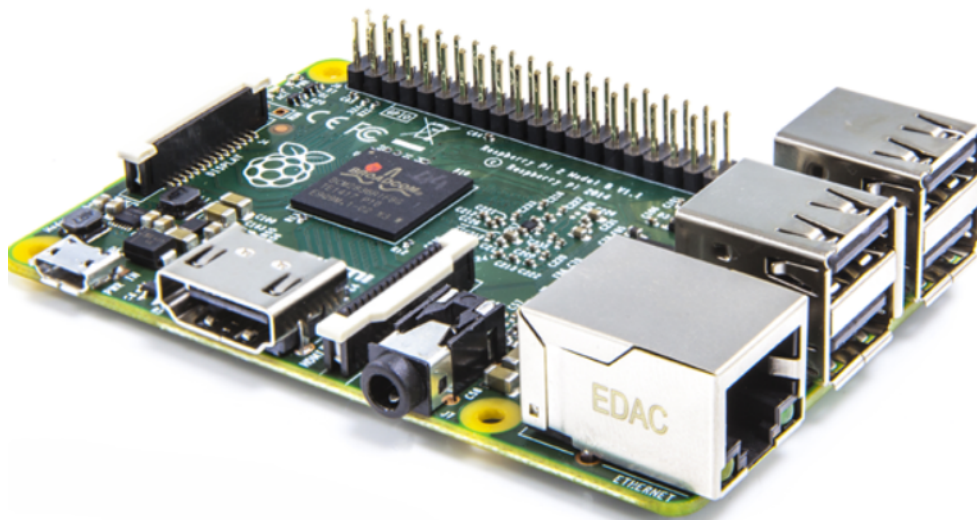


Figura 2-9.: Pinout arduino nano.[24]

### 2.1.7. Raspberry Pi

Raspberry Pi utiliza una arquitectura para el procesador ARM, esta arquitectura es de tipo RISC (Reduced Instruction Set Computer), es decir, utiliza un sistema de instrucciones realmente simple lo que le permite ejecutar tareas con un mínimo consumo de energía. El software es open source siendo un sistema operativo oficial una versión adaptada de la distribución Debian, denominada Raspbian, aunque permite usar otros sistemas operativos, incluido una versión de Windows 10 IoT Core. La fundación da soporte para las descargas de las distribuciones para arquitectura ARM.





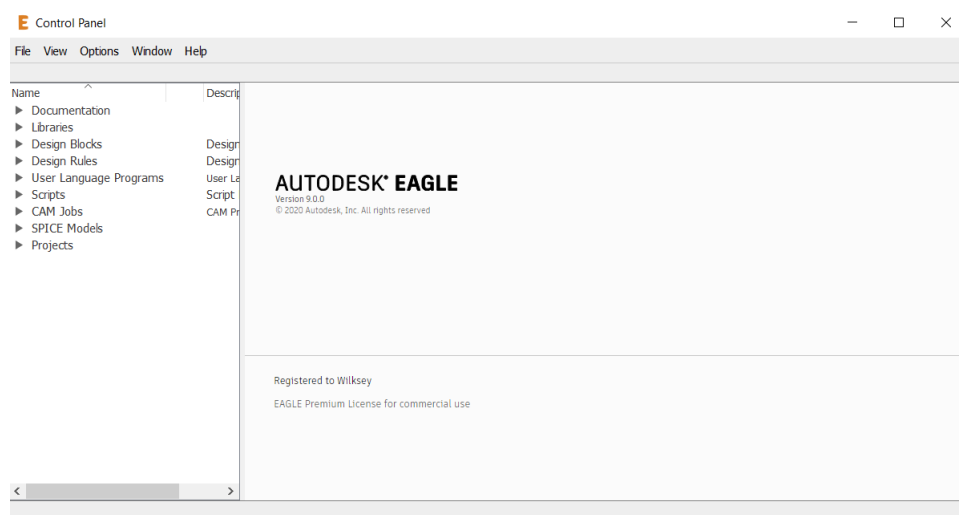
**Figura 2-10.:** Raspberry pi 3.[19]

Resumen de tarjetas de desarrollo			
Nombre	Arduino Mega	Arduino Nano	Raspberry pi
Modelo	R3	R3	Pi zero W
Procesador	Atmega 2560	ATmega328	Broadcom BCM2835
Frecuencia de reloj	16mHz	16mHz	1GHz
RAM	8KB	2KB	512MB
Flash	256KB	32KB	SD Card
Voltaje de operación	7-12V	5V	5V
Mínima potencia	0.3W	0.3W	0.5W
Puertos digitales	54	14	40
Puertos analógicos	16	8	N/A
I2C	2	1	1
SPI	1	1	1
UART	2	1	1
Dev IDE	Arduino IDE	Arduino IDE	IDLE,scratch,MU
Ethernet	N/A	N/A	10/100 MB
USB Master	N/A	N/A	USB2.0

**Tabla 2-4.:** Comparación de tarjetas de desarrollo para módulo de calidad del aire (Autor).

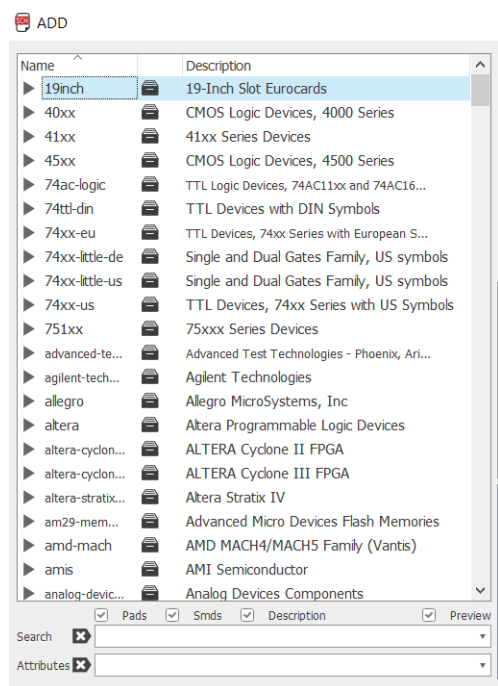
## 2.2. Diseño electrónico de integración módulo de calidad del aire.

En esta sección se presenta el diseño electrónico de la PCB para el cual fue necesario el aprendizaje de uso de diferentes tipos de software especializados para el diseño de las PCB, se trabajo con el software Autodesk Eagle versión 9.5 free, a continuación se presenta el procedimiento para el diseño de la tarjeta.



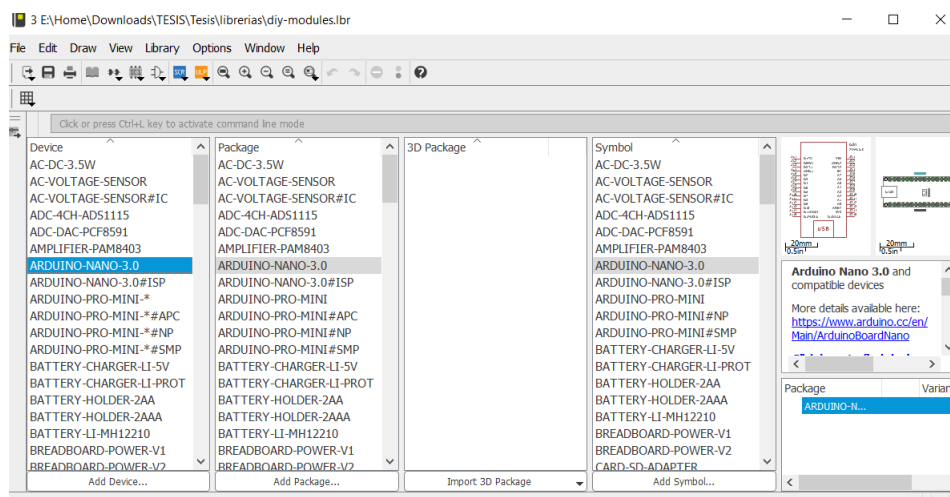
**Figura 2-11.:** Panel Principal Autodesk Eagle.[3]

En el panel principal de Eagle **2-11** en la opción new proyect se crean los proyectos, es necesario la creación del proyecto el cual genera una nueva carpeta con el nombre del proyecto e internamente contiene todos los archivos relacionados a los esquemáticos y las tarjetas diseñadas, también se pudo observar una introducción al programa con el diseño basado en determinadas reglas internacionales de diseño a seguir, algunos ejemplos de diseño de circuitos electrónicos y el manejo de las herramientas del programa Autodesk Eagle.



**Figura 2-12.:** Librerías de componentes por defecto del software.[3]

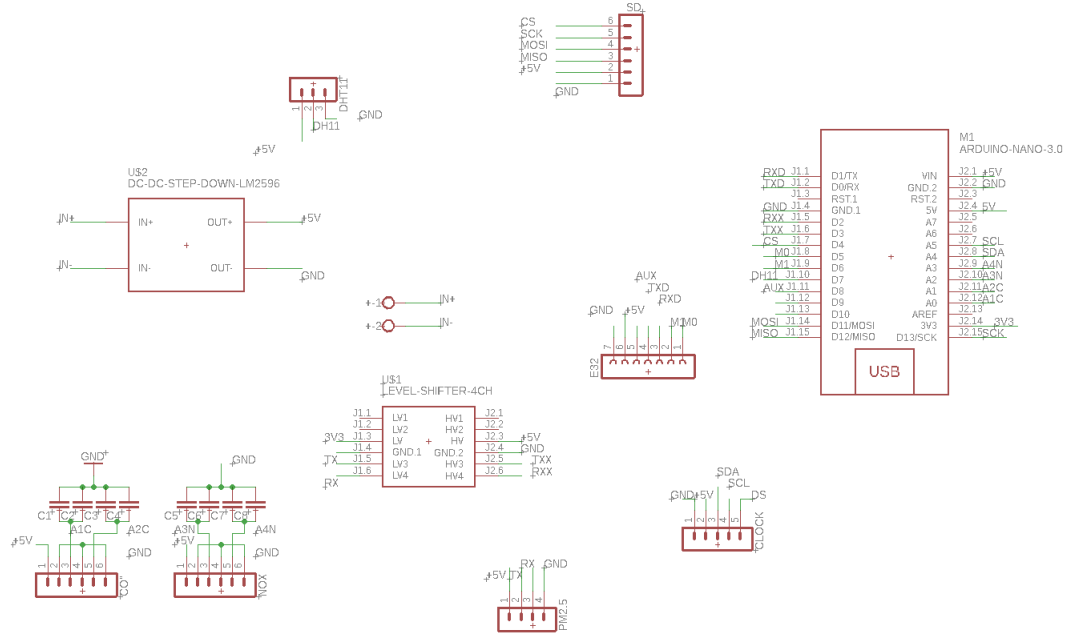
Las librerías básicas del programa contienen diversos tipos de componentes como lo son resistencias, capacitores, gran variedad de transistores y configuraciones de transistores, tipos de conectores, pines de conexión, módulos de comunicación, componentes superficiales, entre otros elementos electrónicos. Determinado por fabricante, referencia, dimensiones y aplicación en la cual van a ser empleados los dispositivos.



**Figura 2-13.:** Librerías de componentes especiales del software.[5]

Las librerías especiales contienen diferentes componentes electrónicos, especiales para el diseño del módulo de la calidad del aire, fue necesario descargar diferentes librerías de Eagle,

las librerías de arduino, Sparkfun, módulos convertidores de nivel de voltaje, el real time, MicroSD y la fuente DC DC tipo buck, Eagle cuenta con gran variedad de librerías en la red para descarga gratuita, también es posible crear las propias librerías a partir de las dimensiones de los componentes y su correspondiente pinout.

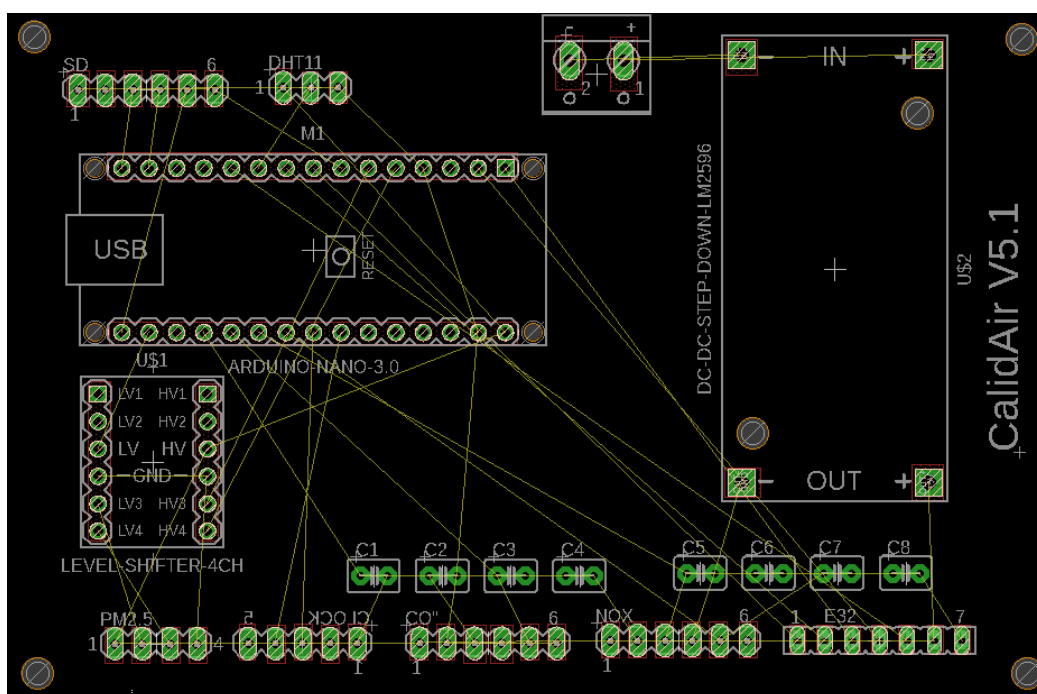


**Figura 2-14.:** Esquemático de componentes módulo de calidad del aire. (Autor)

Teniendo las correspondientes librerías de elementos electrónicos necesarios para la implementación del módulo de calidad del aire, se procede al diseño del esquemático donde se puede observar varios conectores esto para el caso de los módulos RTC DS1307, MicroSD, E32, Convertidor de nivel lógico y para los sensores de CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y PM 2.5.

En el panel del esquemático hay múltiples herramientas, añadir componentes, nombre de los componentes, la opción wire para la conexión con otros elementos, también es posible realizar la simulación de los circuitos desde el esquemático de Eagle, como se puede ver en la figura 2-14, se realizó la conexión de los diferentes componentes a través de etiquetas de nombre entre los pines y sus terminales de conexión, para el caso de los sensores fue necesario dos entradas analógicas por sensor de alphasense, donde con los capacitores se realiza un bypass para la salida de la entrada analógica al microcontrolador, a través del bypass de condensadores implementado en el circuito electrónico el cual deriva señales de corriente alterna no deseadas en una línea de corriente continua, lo cual permite que la señal sea puramente corriente continua, eliminando los ruidos y reduciendo las EMI, para el sensor de PM 2.5 se requirió dos entradas digitales para las cuales dentro de la programación del microcontrolador hay que activar la función de SoftwareSerial para leer y escribir por estos pines debido a eso reciben la etiqueta de TXX y RXX los pines provenientes de la salida del convertidor

lógico, es de vital importancia para el sistema contar con una fuente regulada debido a que independientemente de la fuente de alimentación el voltaje que entra a los componentes y al microcontrolador sea de 5V para su óptimo funcionamiento, la fuente de alimentación bien puede ser una fuente dc de 12V o más, con la idea de hacer de un sistema eficiente es posible alimentar con sistemas fotovoltaicos.



**Figura 2-15.:** Organización elementos dentro de la PCB. (Autor)

Al organizar los componentes dentro del layout de borde se pueden apreciar los caminos de conexión (líneas amarillas), los cuales corresponden a las etiquetas puestas en el esquemático, es necesario tener en cuenta estas conexiones puesto que dependiendo de esto así mismo se procede a organizar los elementos de la board de la mejor manera posible para así al generar los caminos lleguen todos a su correspondientes terminal, optimizando la organización de la board, la probabilidad de conexión de todos los caminos es muy alta, además de tener en cuenta que se genera la menor cantidad posible de caminos y truehole en la PCB.

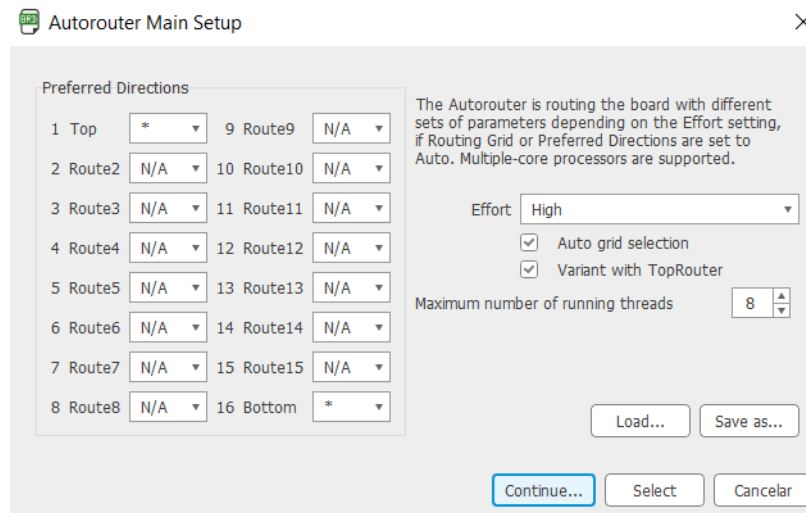


Figura 2-16.: Generación Autoroute. (Autor)

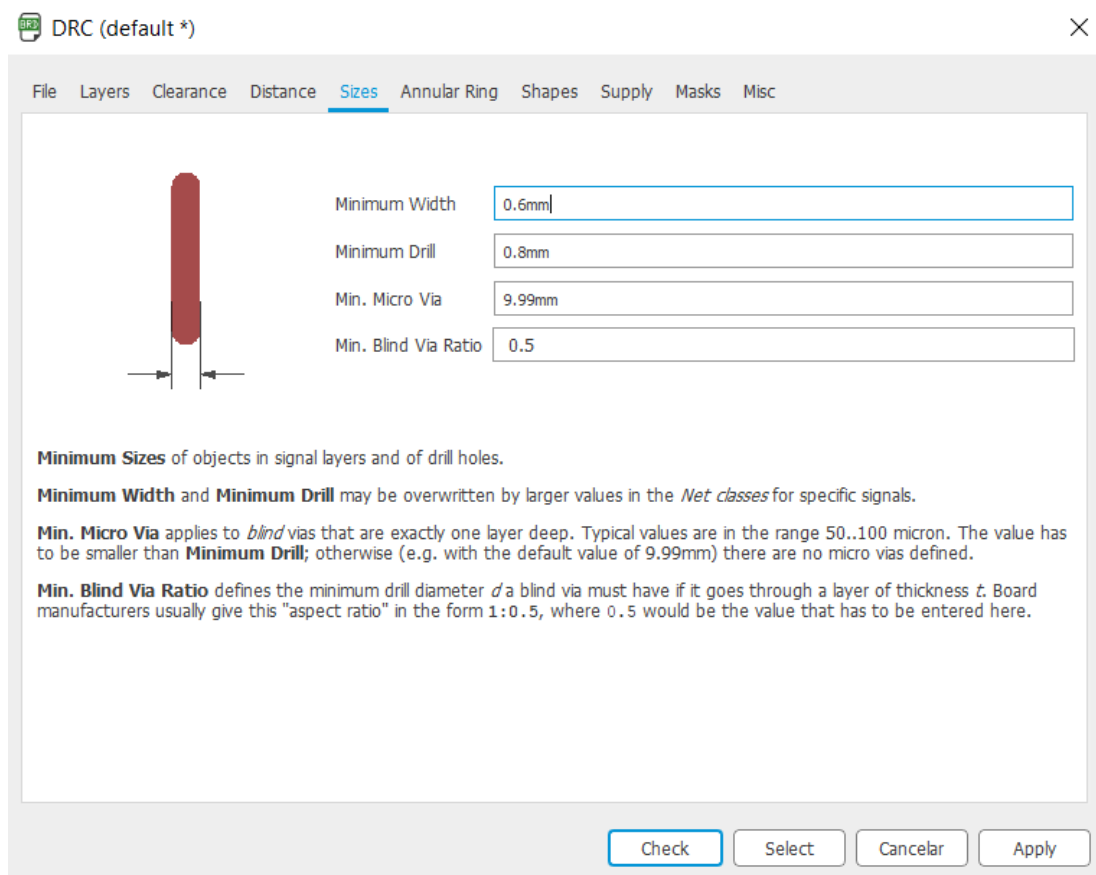
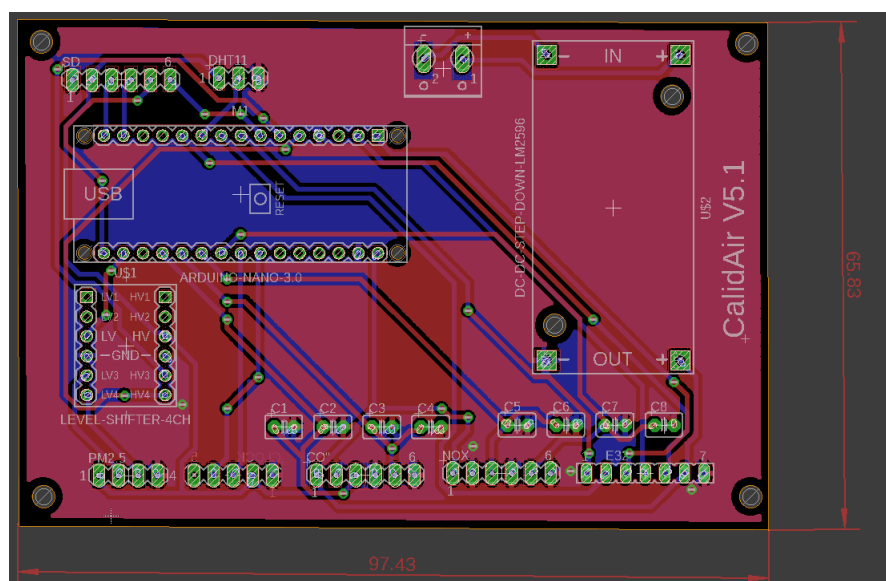


Figura 2-17.: Detalles de configuración del autoroute. (Autor)

Acomodados los componentes de la PCB se procede a la configuración del autoroute donde dependiendo el flujo máximo de corriente que pasa por el sistema, se toma el ancho de la

pista, debido al bajo consumo de corriente del sistema se diseñaron las vías de 0.6mm de ancho y los hole de 0.8mm, Autodesk Eagle trabaja con diferentes sistemas de medición para este caso se tomó en unidad de milímetros, como podemos ver en la figura **2-16** se configuro el sistema para hacer a doble capa las vías y pistas de la PCB, eso significa que los caminos van tanto por la parte superior como inferior de la PCB, en el caso de la figura **2-16**, High significa la alta prioridad que tiene generar el autoroute, una vez terminado el autoroute se procede a la revisión de los caminos uno a uno para tener completa certeza de la eficiencia del autoroute, cuando el porcentaje de conexión del autoroute es inferior al 100 por ciento es necesario realizar la conexión de aquellos caminos que no se conectaron a través del autoroute de forma manual.



**Figura 2-18.:** PCB con mascarás de tierra.(Autor)

Una vez generado el autoroute y las conexiones manuales faltantes se llegó a lo observado en la figura **2-18**, se puede observar que el tamaño de la PCB, es de aproximadamente 66mm de ancho por 96 mm de largo, las conexiones que van en la capa superior e inferior, se realizó un arreglo dentro de la PCB para el cual en todos los terminales se colocó una capa de restricción de paso por la capa superior, esto con el fin de que los puntos de soldadura de todos los componentes sea únicamente por la capa inferior, los Through-Hole deben ser soldados por ambas caras. Además se generaron dos cubiertas de mascara para las tierras una en la capa superior y la otra en la capa inferior como se ve en la figura **2-18**.

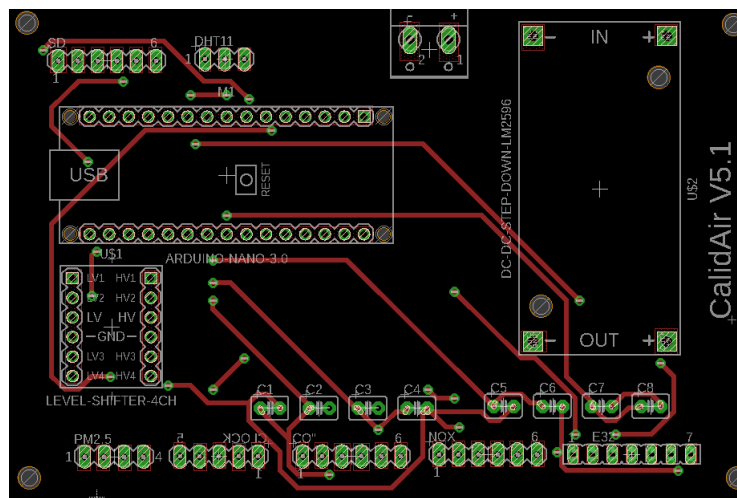


Figura 2-19.: Capa superior PCB.(Autor)

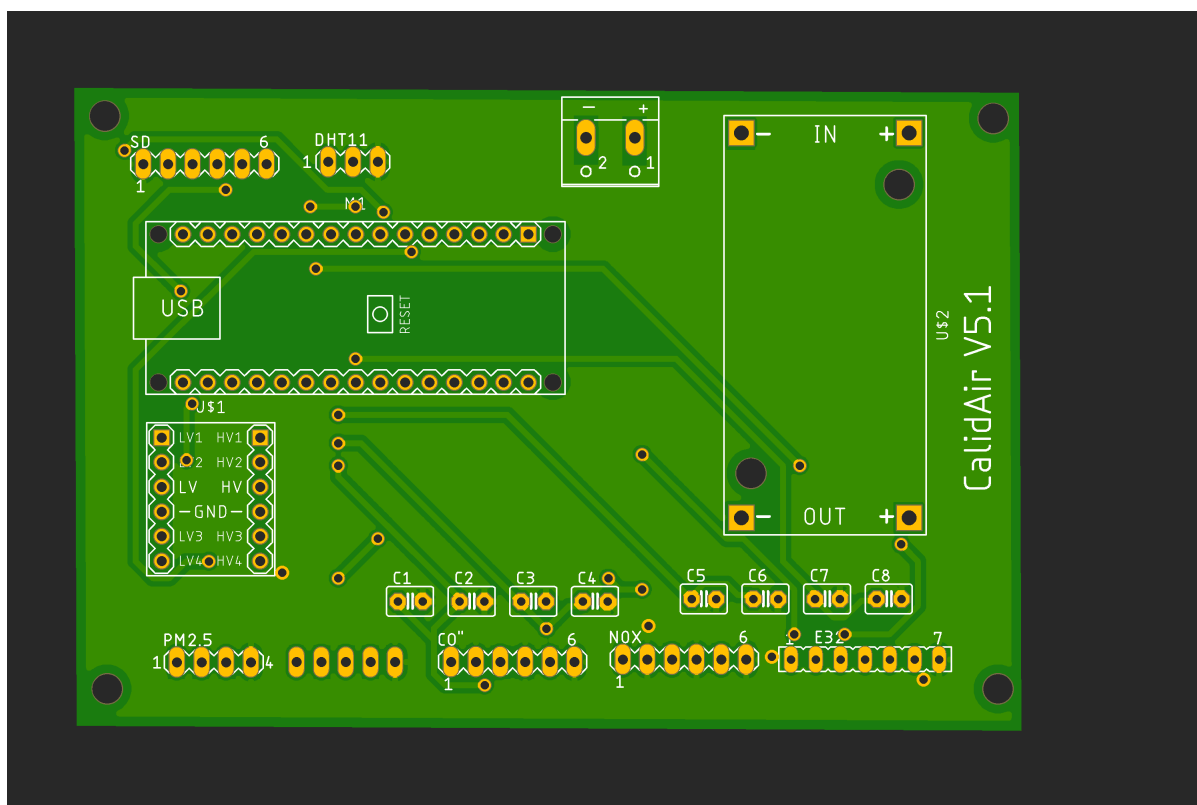
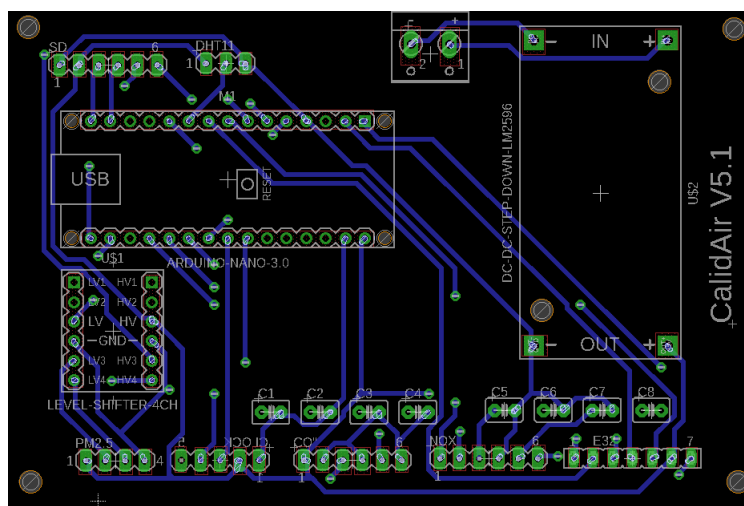
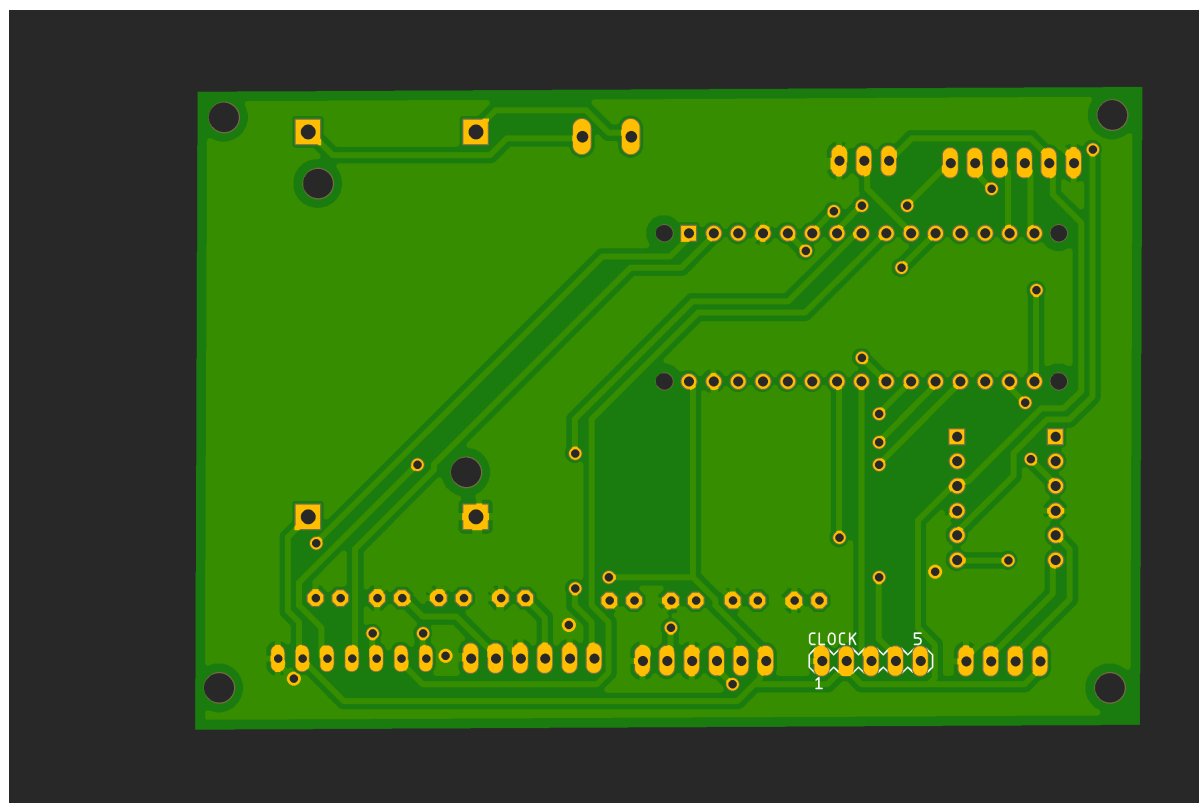


Figura 2-20.: Capa superior PCB modo manufactura.(Autor)





**Figura 2-21.:** Capa inferior PCB.(Autor)



**Figura 2-22.:** Capa inferior PCB modo manufactura(Autor).

Eagle brinda la opción de ocultar las capas para observar de distintas formas la conexión en la PCB, como se aprecia en las figuras **2-19** **2-21**, también tiene la opción manufacturing donde se observa la PCB en un render, su presentación real, se toman las vistas superior e inferior de la PCB como se muestra en las figuras **2-20** **2-22**.

Preview Board Drills		
Property		
Area (Bounding Box)	6458.79mm2	10.01in2
Width	97.55mm	3.841in
Height	66.21mm	2.607in
▼ Stackup		
Copper Layers	2	
Board Thickness	1.57mm	0.062in
▼ Components		
Components on Top Layer	18	
Components on Bottom Layer	1	
SMD Components on Top Layer	0	
SMD Components on Bottom Layer	0	
PTH Components on Top Layer	18	
PTH Components on Bottom Layer	1	
Component Density Top Layer	0.28cm-2	1.82in-2
Component Density Bottom Layer	0.02cm-2	0.10in-2
► Pads		
▼ Drills		
Number of Drills	141	
Number of PTH Drills	101	
Number of NPTH Drills	10	
Number of Via Drills	30	
Minimum Drill Size	0.80mm	0.031in
Maximum Drill Size	3.00mm	0.118in
Minimum PTH Drill Size	0.81mm	0.032in
Maximum PTH Drill Size	1.50mm	0.059in
Minimum NPTH Drill Size	1.65mm	0.065in
Maximum NPTH Drill Size	3.00mm	0.118in
Minimum Via Drill Size	0.80mm	0.031in
Maximum Via Drill Size	0.80mm	0.031in
▼ Routing		
Number of Signals	29	
Minimum Copper Trace Width	0.60mm	0.024in

Figura 2-23.: Detalles de diseño PCB

Eagle ofrece el resumen de detallado del diseño de la PCB **2-23**, donde se observa las propiedades de la board: dimensiones, componentes, cantidad de Drills y todo lo relacionado a las conexiones llamado routing.

## 2.3. Adquisición de datos y programación del microcontrolador

---

**Algorithm 1** Variables Globales y Filtro digital FIR
 

---

```

1:  $COWE = 349$                                 ▷ Valores datos sensores electroquimicos de CO y NO2
2:  $COAE = 337$ 
3:  $COSensi = 0,530$ 
4:  $NO2WE = 234$ 
5:  $NO2AE = 225$ 
6:  $NO2Sensi = 0,226$ 
7:  $N = 10$                                        ▷ Número de muestras
8: function FIR(ppbCO)
9:    $COval = ppbCo$ 
10:   $suma = (m0 + m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 + m7 + m8 + m9)$  ▷ Sumatoria de
    las 10 muestras.
11:   $Promedio = 0,1 * suma$                        ▷ Promedio.
12:   $m1 = m0$ 
13:   $m2 = m1$ 
14:   $m3 = m2$ 
15:   $m4 = m3$ 
16:   $m5 = m4$ 
17:   $m6 = m5$ 
18:   $m7 = m6$ 
19:   $m8 = m7$ 
20:   $m9 = m8$ 
    return  $Promedio$ 
21: end function
  
```

---

En el algoritmo 1 se inicializaron las variables equivalentes a los pines de los sensores de alphasense donde con las hojas de datos de fabricante se estableció el valor en mV de WE y AE, seguidamente se implementó la función FIR, la cual es la encargada del análisis de los datos a mostrar.

Fue necesario la implementación de un filtro digital dentro del algoritmo con el fin de obtener mayor precisión en la medición del CO y NO<sub>2</sub>, ya que al ser señales analógicas y como consecuencia son perturbadas por otros sistemas. En un filtro FIR (Finite Impulse Response), los coeficientes de prealimentación de la ecuación de recurrencia son los coeficientes de la respuesta al impulso y los coeficientes de realimentación son nulos, donde el filtro FIR ofrece una respuesta de fase más lineal, evitando entrar oscilación por tanto no es inestable ya que los filtros FIR solo presentan polos en el origen y no poseen una realimentación, se

basan en obtener la salida a partir de las entradas actuales y anteriores según la cantidad de muestras definidas para el filtro, a mayor cantidad de muestras mayor precisión y mayor costo computacional, a continuación ecuación en diferencias del filtro FIR.

$$y(n) = A_0x(n) + A_1x(n-1) + A_2x(n-2) + \dots + A_Lx(n-L) \quad (2-1)$$

Para el funcionamiento dentro del microcontrolador se inicializo el hardware, se configuro el filtro FIR, cálculo de los coeficientes, captura de la señal de los sensores provenientes del ADC y se normalizan, aplicación del filtro FIR donde se toma una muestra por minuto y se halla el promedio.

---

**Algorithm 2** Funcion SETUP
 

---

```

1: function SETUP
2:   Serial.Begin = 9600bds
3:   ▷ inicialización Módulos SD,RTC y sensor Material particulado
4:   HPMA115S0 ▷ llamado libreria sensor de material particulado
5:   if HPMA115S0Start then
6:     Inicio muestreo del sensor
7:   else
8:     Error
9:   end if
10:  if SDBegin then
11:    Almacenamiento de datos en tarjetaSD
12:  else
13:    Error no hay escritura
14:  end if
15:  if RTCBegin then
16:    DateandTime
17:  else
18:    ErrorRTC fallo
19:  end if
20: end function

```

---

En el algoritmo 2 se realizo la instancia e inicialización de los módulos del sensor de PM 2.5, MicroSD, y RTC 1307, donde en caso de fallo de la inicialización se imprima en pantalla que, el o los módulos no están en funcionamiento, es necesario inicializar la comunicación serial ya que el sensor se comunica vía serial a los pines del Arduino.

**Algorithm 3** Funcion LOOP

---

```

1: function LOOP
2:   inicializar variables de sensores y módulos e imprimir en pantalla
3:   for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do           ▷ Hallar concentración en ppb de los gases a monitoreados
4:      $DinitroWEmV = (analogRead(DinitroWE) * (vin/1023,0)) -$ 
        $ElectronicZeroNO2WEmV;$ 
5:      $DinitroAEmV = (analogRead(DinitroAE) * (vin/1023,0)) -$ 
        $ElectronicZeroNO2AEmV;$ 
6:      $ppb\ NO2[i] = (DinitroWEmV - DinitroAEmV) / DinitroSensi;$ 
7:      $CarbonoWEmV = (analogRead(CarbonoWE) * (vin/1023,0)) -$ 
        $ElectronicZeroCOWEmV;$ 
8:      $CarbonoAEmV = (analogRead(CarbonoAE) * (vin/1023,0)) -$ 
        $ElectronicZeroCOAEmV;$ 
9:      $ppb\ CO[i] = (CarbonoWEmV - CarboAEmV) / CarboSensi;$ 
10:     $FIR(ppbCO, ppbNO2)$            ▷ Llamado función filtro
11:    ▷ Lectura y almacenamiento Temperatura Humedad relativa y PM2.5
12:     $Hum[i] = read$ 
13:     $Temp[i] = read$ 
14:     $HPMA115S0[i] = read$ 
15:  end for
16:   $MyFile = File.txt$            ▷ Crear archivo txt
17:  if  $MyFile$  then
18:     $MyFile(Datos\ sensores\ y\ módulos)$ 
19:  else
20:     $Error\ no\ hay\ escritura\ en\ Datalogger$ 
21:  end if
22: end function

```

---

En el algoritmo 3 es necesario tener en cuenta el modo de trabajo de cada uno de los sensores, el cual funciona de la siguiente forma, cada uno de los sensores tiene 6 pines, 2 para la energía (+/-), 2 para el electrodo de trabajo (+/-), y 2 para el electrodo auxiliar (+/-), con una tierra interna compartida. El electrodo de trabajo da un valor a la clavija analógica del Arduino que se lee entre 0-1023, al igual que el electrodo auxiliar (AE).

Este valor se convierte entonces a mV basándose en el voltaje de referencia del Arduino, que es un estándar de 5V. Al hacer la medición, el Arduino suministraba 5,074V a los sensores, que luego se convierte en la referencia utilizada para convertir el valor del WE y AE a mV (línea 4-6 ). Multiplicando el valor analógico de WE y AE por 5.074V/1023 nos da el valor de mV de cada uno de los sensores.

Con los sensores hay una hoja de calibración de valores específicos de cada sensor, Alphasense mide cada sensor por el desplazamiento específico del cero con respecto a WE y AE. Los

valores de calibración y sensibilidad son específicos para el sensor implementado. Cambiar un sensor por uno nuevo, requiere un ajuste del código (línea 1-7) del algoritmo 1. Con el valor de salida de la clavija analógica, se resta el cero electrónico de WE y el cero electrónico de AE de los valores de WE y AE, hallando los valores corregidos, y encontrando la diferencia entre ellos, se obtiene el cambio real de voltaje ( $\Delta V$ ), a partir del cual multiplica por el recíproco de sensibilidad para obtener el valor del contaminante en ppb, como se observa en el algoritmo 3 (líneas 6 y 9).

## 3. Integración nodos de monitoreo a red IoT de calidad del aire.

En este capítulo se observa la integración de dos módulos de calidad del aire a una red IoT y llevado a un servicio web donde es posible la visualización de los datos de CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> y sus correspondientes gráficas de medición de la calidad del aire, se explicara las dos partes de las cuales consta esta integración, en la primera parte es fundamental la conexión entre los módulos y la pasarela (Raspberry pi) y la segunda etapa llevar los datos de la pasarela al servicio web IoT.

### 3.1. Comunicación módulos calidad del aire y Raspberry

#### 3.1.1. LoRaWAN

LoRa es un acrónimo de las palabras largo y alcance, diseñado como una solución a las limitaciones de corto alcance de WiFi y Bluetooth. LoRa se concibió como una red de área amplia (WAN), específicamente para la integración en Internet de las cosas (IoT).[14]

Describe una red de dispositivos de largo alcance, área amplia y baja potencia que se pueden usar como nodos bidireccionales con comunicación segura y amplia libertad para la personalización en velocidad, distancia de transmisión / recepción y tamaño de paquete de información. Los dispositivos LoRa suelen ser excelentes para redes dispersas de sensores o áreas donde Bluetooth o WiFi son inaccesibles o no son rentables.[14]

LoRa es similar a Bluetooth y WiFi en que opera en una banda de frecuencia asignada a aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM). La banda LoRa ISM permitida en los EE. UU. Es la banda 902-928 MHz, mientras que Bluetooth y WiFi funcionan en las bandas 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz (5G WiFi). Esta es también la razón por la cual muchos módulos LoRa citan 915MHz como frecuencia de operación, porque 915MHz es la frecuencia central de la banda asignada por la FCC en los Estados Unidos. Las bandas ISM se pueden ver escritas debajo de cada banda respectiva. Se puede encontrar un cuadro con zoom en el sitio de la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA) . [14]

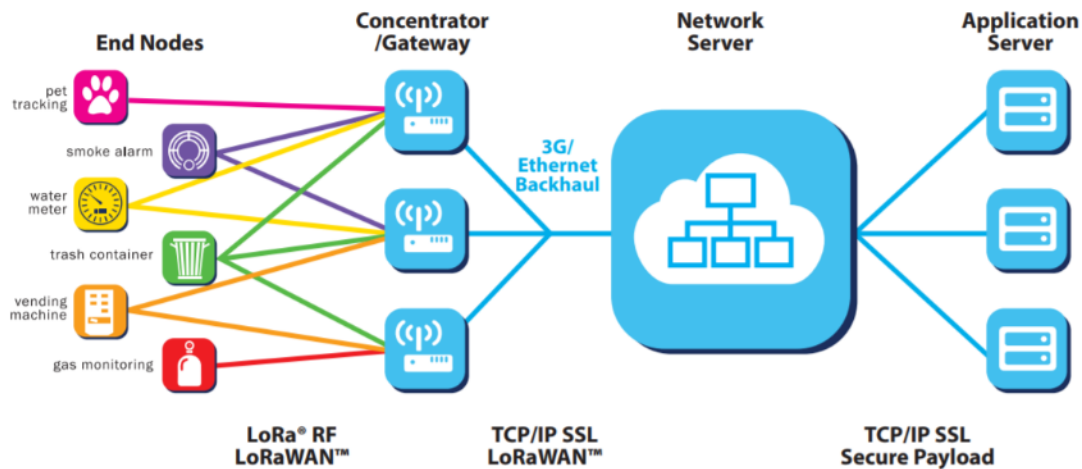
$$XdBm = 10\log_{10}\left(\frac{P}{0,001W}\right) \quad (3-1)$$

Donde X=Potencia de salida en dBm, y P=Potencia de salida en mW.

$$P = 0,001 * 10^{\frac{X}{10}} \quad (3-2)$$

Se implemento opcionalmente el módulo de 30dBm donde hallando la potencia según la ecuación 3-2 es de 1W. Las salidas de potencia también se pueden usar para cuantificar la distancia efectiva de transmisión de cada módulo.

LoRaWAN es un protocolo de red que usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa, se compone de dos partes principalmente: gateways y nodos, los primeros son los encargados de recibir y enviar información a los nodos y los segundos, son los dispositivos finales que envían y reciben información hacia el gateway. Como se ve en la figura 3-1. Los dispositivos finales se comunican con puntos de acceso usando los módulos LoRa, los puntos de acceso los cuales reenvían, integran la información al servidor de red, los puntos de acceso se convierten en redireccionadores o convertidores de protocolo, los servidores de red siendo los responsables de decodificar los paquetes visibles en la capa de aplicación,



Arquitectura de LoRaWAN.

Figura 3-1.: Arquitectura protocolo LoRaWAN.[14]

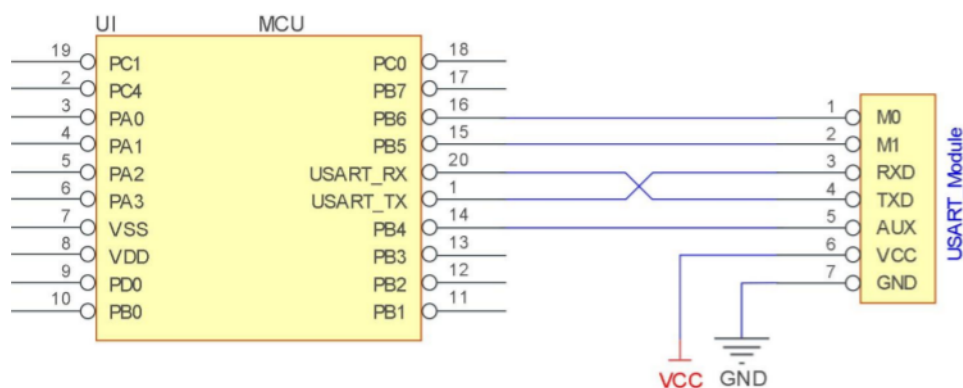
### 3.1.2. EBYTE 433MHz conexión con arduino

Los módulos EBYTE se comunicarán con Arduino utilizando el protocolo Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART). El uso de UART simplifica el cableado y el proceso necesarios para llevar a cabo la comunicación entre Arduino y el dispositivo LoRa.



Comunicación E32 con Arduino		
Pin E32	Pin Arduino	Descripcion
M0	D4	Funciona con M1 para decidir el modo de trabajo del módulo (usar resistencia pull-up).
M1	D5	Funciona con M0 para decidir el modo de trabajo del módulo (usar resistencia pull-up).
RXD	TX	RX para comunicación UART.
TXD	RX	TX para comunicación UART.
AUX	-	Notifica a Arduino sobre varias condiciones de trabajo (también se puede usar como interrupción externa)
VCC	-	Alimentación 5V.
GND	-	Tierra del sistema.

**Tabla 3-1.:** Comunicación E32 con Arduino.[14]



**Figura 3-2.:** Conexión microcontrolador y módulo ebyte 433TD30.[14]

E32-TTL-100 es un módulo transceptor inalámbrico de 1W con LoRa tecnología de espectro ensanchado, funciona a 410 441MHz (Predeterminado: 433MHz), basado en el RFIC SX1278 original importado de SEMTECH, se dispone de transmisión transparente, nivel TTL. El módulo adopta la tecnología de espectro ensanchado LoRa, lo que significa que la distancia de transmisión es mucho mayor que antes. Las ventajas de este módulo son una densidad de potencia más concentrada y un mejor rendimiento anti-interferencias. El módulo tiene la función de encriptación y compresión de datos. Los datos que el módulo transmite en el aire se caracterizan por su aleatoriedad. Y con el riguroso encriptado y desencriptado, la interceptación de datos se vuelve inútil. La función de compresión de datos puede disminuir

el tiempo de transmisión y la probabilidad de ser una interferencia, mientras que mejora la fiabilidad y la eficiencia de la transmisión.

## 3.2. Conexión Red IoT con servicio web y aplicación de monitoreo de calidad del aire.

### 3.2.1. Ubidots

Empresa de servicios de ingeniería la cual ofrece soluciones de IoT, Ubidots una plataforma de IoT (Internet de las cosas) que habilita la toma de decisiones en empresas de integración de sistemas a nivel global. Este producto permite enviar datos de sensores a la nube, configurar tablas y alertas, especificar con otras plataformas, usar herramientas de análisis y arrojar mapas de datos en tiempo real. Ubidots es una plataforma de IoT que capacita a innovadores e industrias para crear prototipos y escalar proyectos de IoT a producción. La plataforma Ubidots para envío de datos a la nube desde cualquier dispositivo con acceso a Internet. Es posible configurar acciones y alertas basadas en sus datos en tiempo real y desbloquear el valor de sus datos a través de herramientas visuales. Ubidots ofrece una API REST que le permite leer y escribir datos en los recursos disponibles: fuentes de datos, variables, valores, eventos y conocimientos. La API admite HTTP y HTTPS y se requiere una clave API.



**Figura 3-3.:** Ubidots IoT. [22]

Realizado el correspondiente registro en la plataforma se procede a la vinculación de los dispositivos donde la comunicación del módulo con la plataforma es a través de la raspberry pi, por comunicación serial se envió la información del arduino a la raspberry, Python fue necesario hacer la lectura de los datos provenientes del arduino y la comunicación con Ubidots.

**Algorithm 4** Comunicación serial en Python

---

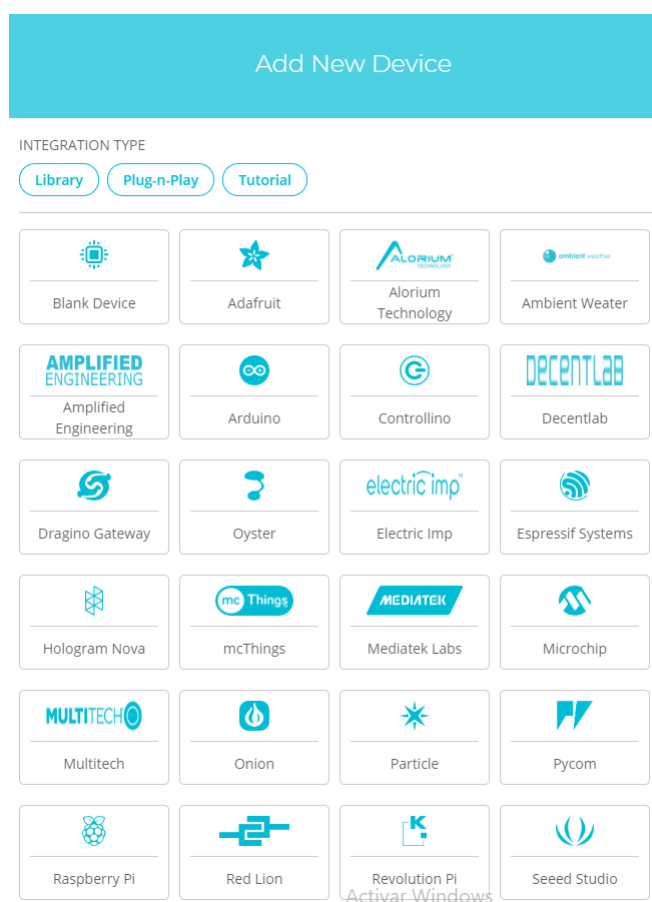
```

1: PuertoSerie = serial.Serial('Puerto', 9600)    ▷ Puerto y velocidad de comunicación
2: while T do do do
3:   arduino = PuertoSerie.readline                ▷ Lectura puerto serial
4:   arduino = str(arduino)                        ▷ Convertir ASCII a String
5:   data = arduino.split(",")                      ▷ Método de separación de datos identificados con el carácter
6:   data[float(i) for i in data]                  ▷ Conversión String a Float
7:   payload = variable1 : data[0]                 ▷ Almacenamiento en vectores de los datos recibidos
   del arduino
8: end while

```

---

Ubidots es compatible con cierta cantidad de dispositivos entre ellos la raspberry.



**Figura 3-4.:** Dispositivos compatibles Ubidots.[22]

---

**Algorithm 5** Comunicación raspberry pi con Ubidots

---

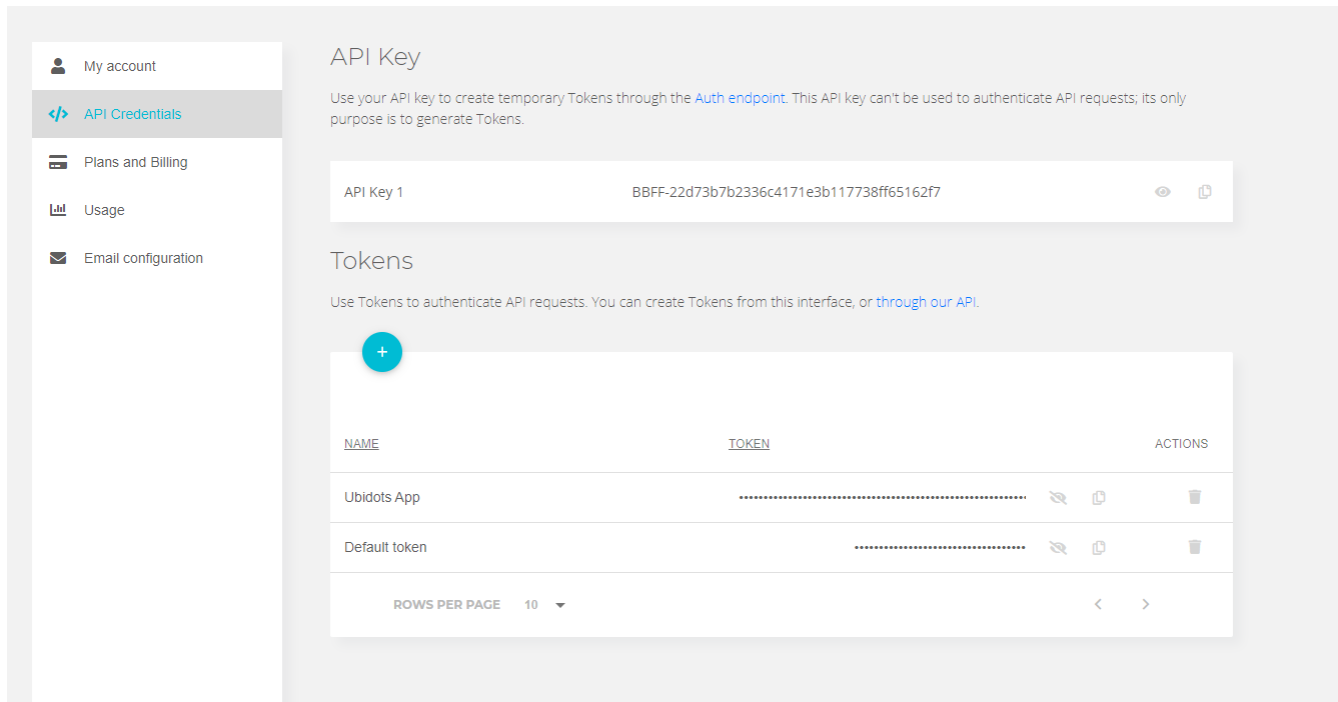
```

1: Lectura puerto serial velocidad de transmision
2: Token = API Credenciales Ubidots
3: Nombre = Nombre del dispositivo Ubidots
4: function ALMACENAMIENTO DATOS ARDUINO(payload)
5:   while T do reue
6:     arduino = PuertoSerie.readline                                ▷ Lectura puerto serial
7:     arduino = str(arduino)                                       ▷ Conversión ASCII a Stringl
8:     data = arduino."                                             ▷ Método de separación de datos identificados con el
        carácter
9:     data[float(i) for i in data]                                ▷ Conversión String a Float
10:    payload = variable1 : data[0]                                ▷ Almacenamiento en vectores de los datos
        recibidos del arduino
11:   end while
12: end function
13: function ENVIO DATOS POR HTTP(payload)
14:   url = "http://industrial.api.Ubidots.com"                    ▷ Envio a Ubidots
15:   url = "http://"/api/v1,6/devices/".format(url, DEVICE_LABEL) ▷ Asociar a
        nombre de dispositivo en Ubidots
16:   json = payload                                                ▷ Encriptar datos en formato JSON para envio a Ubidots
17:   Notificacion de error
18: end function
19: function PROCESAMIENTO DE DATOS(payload)
20:   payload = Asociar nombres de variables a enviar a Ubidots    ▷ Envio a Ubidots
21:   time.sleep(300)                                              ▷ Tiempo de envio cada 5 minutos
22: end function

```

---

Para la comunicación entre la raspberry y Ubidots fue necesaria la implementación de 3 funciones, en la parte inicial es necesario crear la comunicación serial con el arduino, asociar el token de la API y el nombre del dispositivo en Ubidots, seguidamente la función payload es la encargada de la extracción de los valores tomados del arduino para almacenarlos en las variables asociadas a payload, el cual se retorna a las otras dos funciones, la segunda función es la encargada de la creación del enlace web con Ubidots y la API de dispositivos, los datos son encriptados en formato JSON el cual es un formato de intercambio de datos string el cual se basa en codificar, enviar y decodificar, en la última función se asocian las variables declaradas con el valor de las variables tomadas en payload y se determina el tiempo de envío de datos a la API.



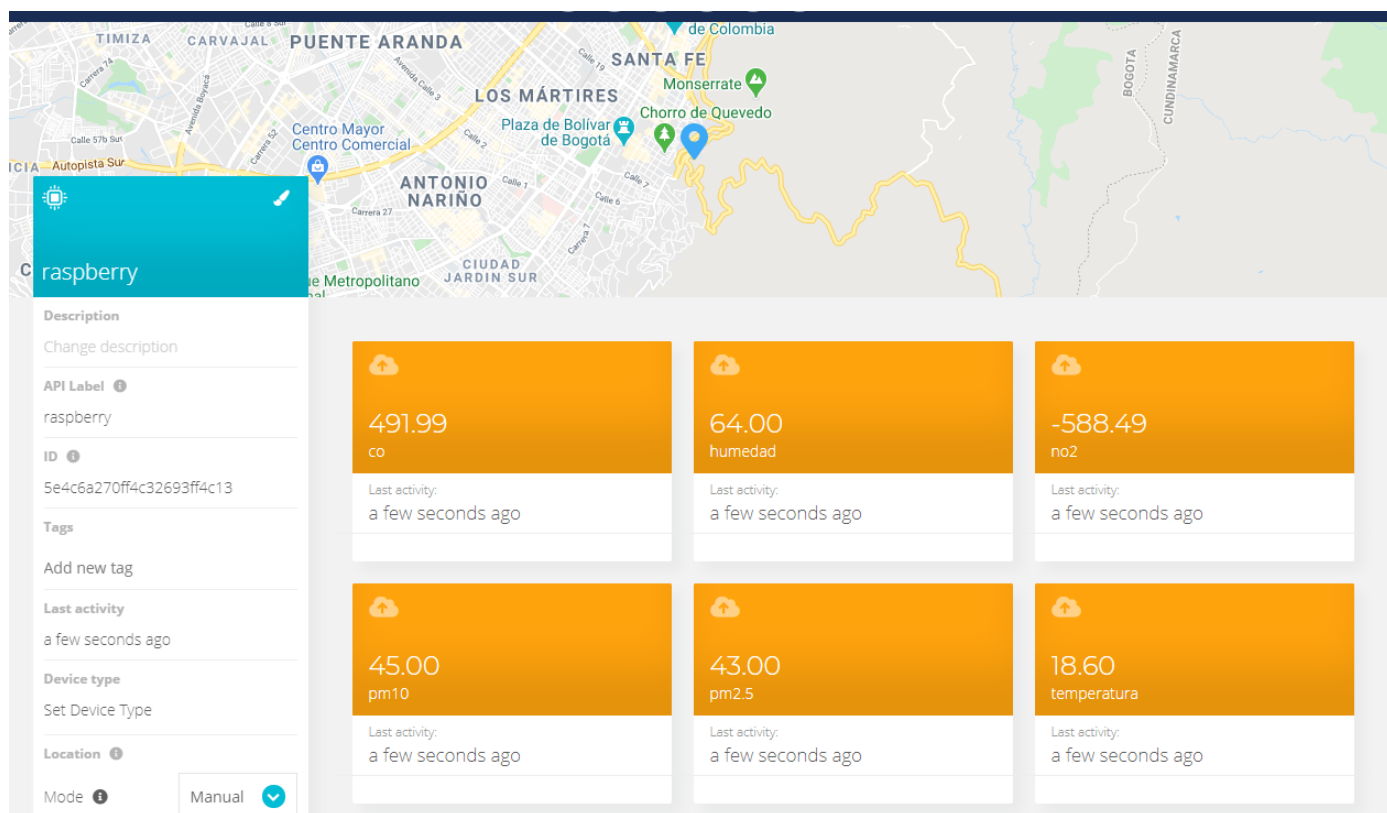
**Figura 3-5.:** Credenciales de la API.[22]

Devices					
<input type="checkbox"/>	NAME	LAST ACTIVITY	CREATED AT ↓	ORGANIZATION	ACTIONS
	portalamericas	a minute ago	2020-03-12 21:31:47 -05:00	SalleAir	
	rasp_centro	3 days ago	2020-03-05 13:09:15 -05:00	SalleAir	

ROWS PER PAGE 30

**Figura 3-6.:** Dispositivos asociados Ubidots.[22]

El valor referente a API key es el valor a ingresar en el código 5 correspondiente al campo de token (línea 2 ) y el dispositivo asociado en el código 5 en la línea 3.

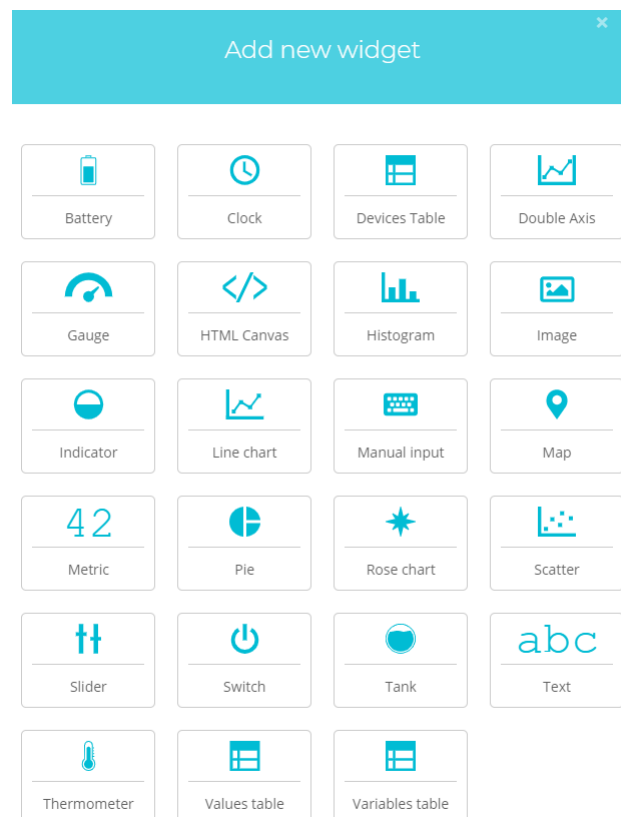


**Figura 3-7.:** Variables asociadas y ubicacion GPS en Ubidots.[22]

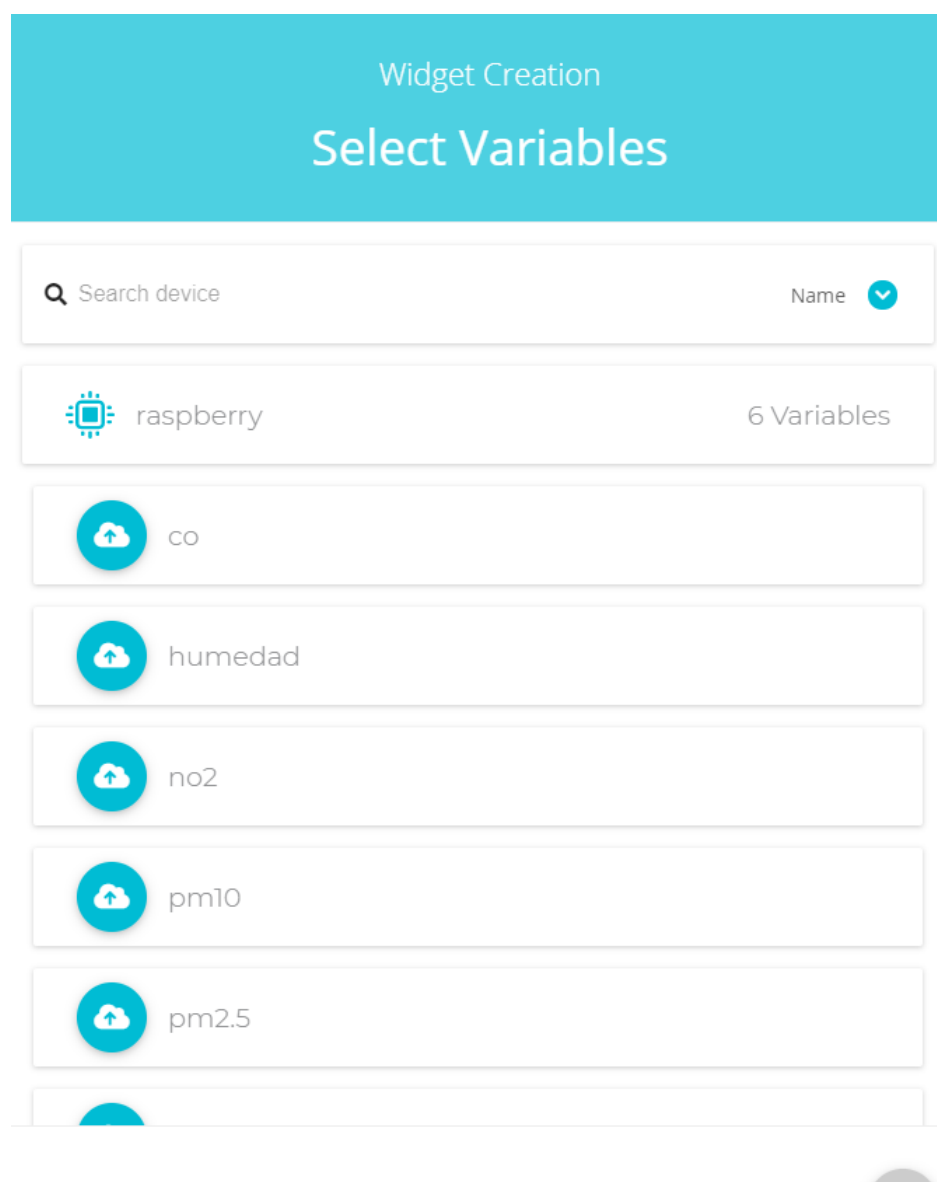
Una vez enlazados los dispositivos con la API se puede observar las variables recibidas por Ubidots, además de poder establecer la ubicación GPS del módulo, las variables recibidas por Ubidots a través de la comunicación entre arduino, raspberry pi y finalmente en Ubidots fueron, CO, NO2, PM 2.5, PM 10, Temperatura y Humedad relativa.



**Figura 3-8.:** Panel de control Ubidots.(Autor)



**Figura 3-9.:** Indicadores y gráficas de variables.[22]



**Figura 3-10.:** Variables en dispositivo.(Autor)

Para la creación de la API es necesario crear el panel central **3-8** donde se observa gráficas, indicadores, hora y fecha, la board visualiza las gráficas de los contaminantes con respecto a el tiempo, además de visualizar en indicadores la temperatura y la humedad relativa del ambiente, como se observa en la figura **3-10** es necesario realizar la asociación de la variable a graficar o indicar las variables obtenidas desde el dispositivo en este caso la Raspberry pi, una vez asociada se puede acceder a darle límites a los ejes en el caso de las gráficas o en el caso de medidores límites inferiores y superiores de medición, la variable traída del dispositivo podrá ser observada en tiempo real.











All organizations 					
Q Search user					
Users					
<input type="checkbox"/>	USERNAME	EMAIL	CREATED AT	ORGANIZATION(S)	
	efrain	ebernalal@unisalle...	2020-02-21 14:21:23 -05:00	<a href="#">CalidAir IOT</a>	 
	stiven	stivenrios9710@g...	2020-02-21 14:20:22 -05:00	<a href="#">CalidAir IOT</a>	 
USERS PER PAGE 10 					

Figura 3-11.: Usuarios para control de acceso.(Autor)

Q Rol de búsqueda				
Roles				
<input type="checkbox"/>	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	PERMISOS	COMPORTAMIENTO
	Visor de paneles	Estos usuarios solo pueden ver los paneles de su ...	<a href="#">6 6</a>	 
	Explorador	Los exploradores pueden crear, editar, ver y elimin...	<a href="#">19</a>	 
	Gerente	Los administradores pueden hacer todo lo que un ...	<a href="#">31</a>	 
	Usuario registrado	Los nuevos usuarios pueden crear, editar, ver y eli...	<a href="#">31</a>	 
	Espectador	Los espectadores pueden ver paneles, dispositivos...	<a href="#">8</a>	 
ROLES POR PÁGINA 10 				
< >				

Figura 3-12.: Roles de usuario.[22]

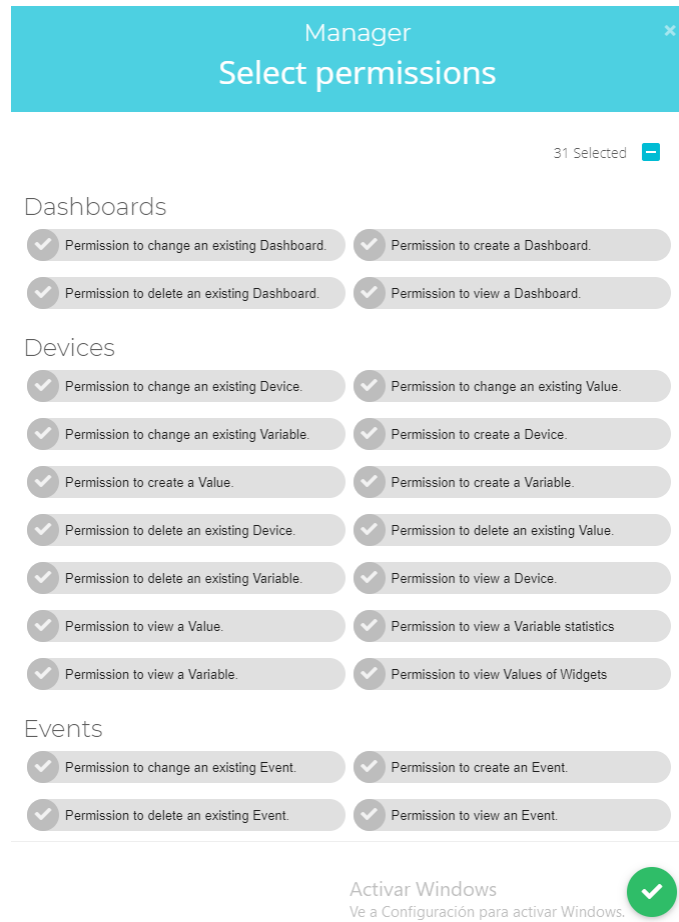


Figura 3-13.: Permisos de usuario. [22]

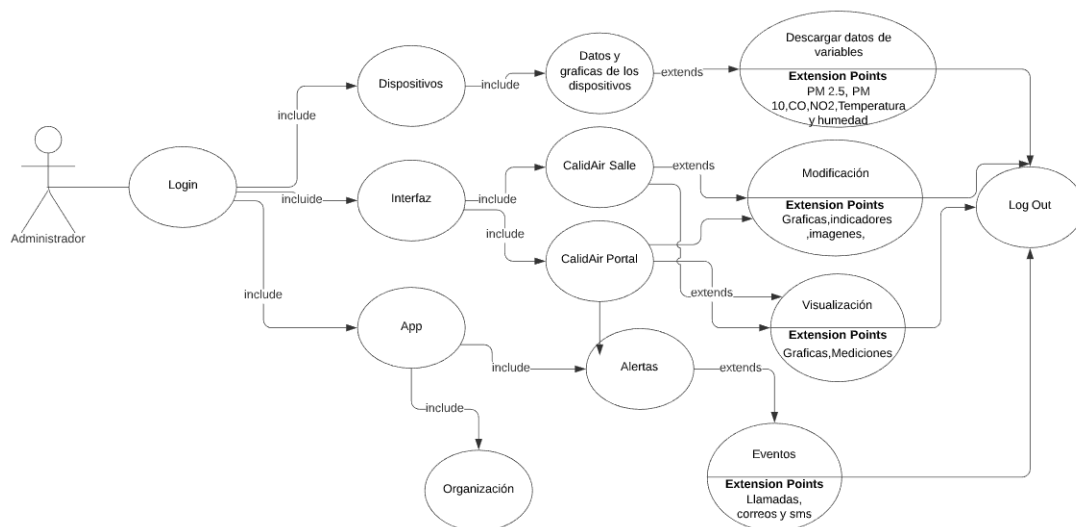
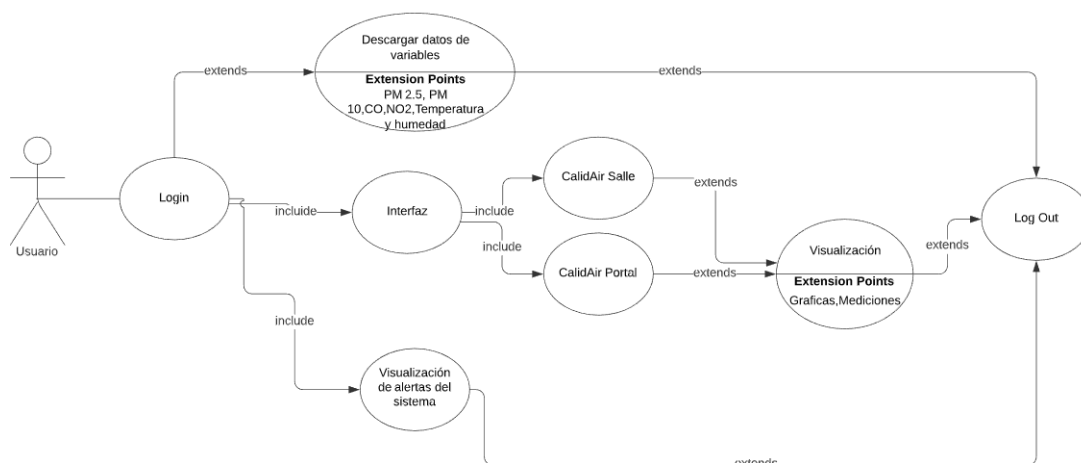


Figura 3-14.: Diagrama casos de uso administrador.(Autor)

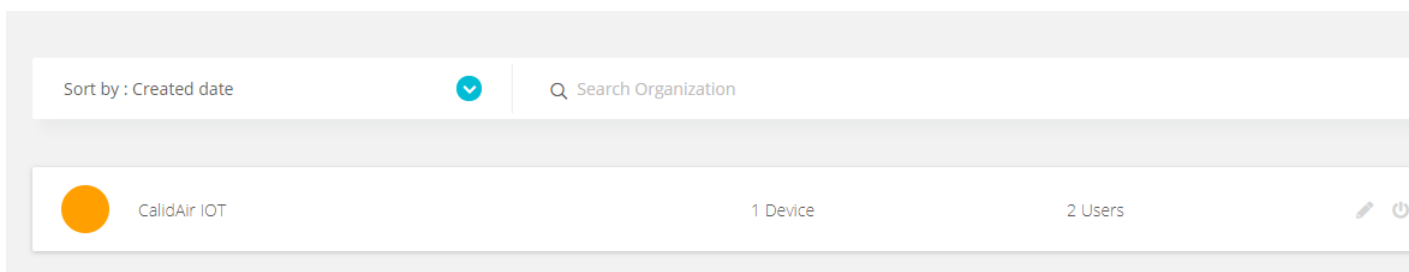
Como se puede observar en la figura 3-14 el administrador tiene la posibilidad de acceder a los dispositivos los cuales son módulos ubicados en la universidad de La Salle sede centro y en inmediaciones del portal de las Americas, la información de estos dispositivos es almacenada en la base de datos de Ubidots, Es posible acceder al sistema de información de calidad del aire según el día y la hora de la toma del dato. En el acceso a la interfaz se visualizan las gráficas de cada uno de los contaminantes: Material particulado, temperatura y humedad, tabla resumen de mediciones máximas, mínimas y average del día, en los visores de métricas se observa el ultimo dato obtenido por el módulo, opcionalmente el administrador puede modificar las variables ejemplo temperatura adicionando nombre a los ejes coordenados y cambio de color de la gráfica.

En el ingreso a la Aplicación es necesario como administrador generar los roles de los usuarios, permisos de usuario, activación de las alertas con respecto a indicadores de calidad del aire y seguidamente generar los eventos los cuales pueden ser correos electrónicos, mensajes SMS, llamadas entre otros, fue necesario la creación de la organización a la cual corresponde el sistema, usuarios y dispositivos, al generar los usuarios para la App es posible ingresar a las plataformas de medición de calidad del aire de cualquier de los módulos



**Figura 3-15.:** Diagrama casos de uso Usuario.(Autor)

Para el caso del usuario una vez realizado el login, el usuario puede acceder a la interfaz donde podrá visualizar los datos provenientes de la red IoT, además de poder descargar los datos de las variables de medición en los módulos a través de un formato pdf o xls, la visualización de las alertas arrojadas por el sistema son enviadas vía correo electrónico o mensaje SMS al móvil para tener en cuenta las precauciones según las alertas arrojadas por el módulo.



**Figura 3-16.:** Organización Ubidots.(Autor)

Para acceder a las bases de datos **3-7**, edición y cambios de la API se generaron roles **3-12** y usuarios **3-11**, para lo cual cada usuario tiene un rol, los roles se podrán observar en la figura **3-12** , es necesario la creación de una organización **3-16** para el caso se tomo como CalidAir y se realizó la asociación entre Organización, roles y usuarios para el control de acceso de la API.

## 4. Calibración y lectura de sensores

Actualmente no hay una norma establecida que defina la calibración de los sensores tipo aire. Muchos procedimientos analíticos, incluyendo algunos procedimientos específicos de analizadores como los métodos EPA, usan nitrógeno puro o sintético para establecer el punto cero. La razón de esto es que el nitrógeno embotellado y el aire sintético puro están fácilmente disponibles. Como resultado, se cree popularmente que el uso de nitrógeno embotellado o sintético es un buen método para poner a cero un sensor.

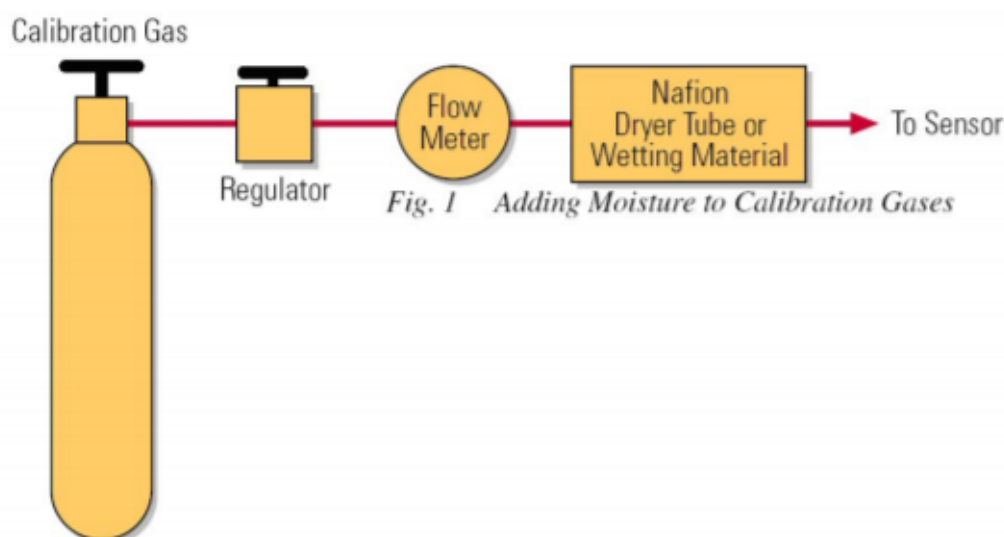
El aire normal contiene trazas de diferentes gases además de nitrógeno y oxígeno. Además, el aire al ambiente normalmente contiene un pequeño porcentaje de vapor de agua, por lo tanto, es mucho más realista y práctico de poner a cero el sensor usando el aire que rodea al sensor cuando se considera que la zona esta limpia. Este punto de referencia puede ser difícil de establecer, por lo tanto, un buen punto de referencia puede estar en el área donde el aire siempre se considera limpio, como en una zona de oficinas. Esto dará una representación más realista del punto cero porque será representativa del aire acondicionado del ambiente.

La falta de vapor de agua puede hacer que el punto cero se lea más bajo que en el aire ambiente haciendo que el sensor cero parezca estar a la deriva. Tomando todos los factores como el tipo de sensor y las condiciones de la aplicación, los siguientes son algunos de los métodos de calibración propuestos:

El aire comprimido tiene la ventaja de que es fácil de regular y puede ser transportado en botella, el aire puede ser usado para calibrar la mayoría de los tipos de sensores, sin embargo, es importante señalar que el monóxido de carbono no es eliminados por los filtros de carbón. Por lo tanto, es imperativo asegurarse de que la concentración de CO en el aire es el mismo que el del ambiente. Las botellas de baja presión son botellas de paredes delgadas y ligeras que normalmente no son retornables y desechables. Las botellas de alta presión están diseñadas para embotellar productos químicos puros y peligrosos, estos frascos están normalmente hechos de aluminio de paredes gruesas que tienen una presión de servicio de 2000 psi.

Para sacar este gas altamente presurizado de la botella para calibrar el sensor, se necesita un montaje regulado, este montaje consiste en un regulador de presión, un manómetro y un limitador de flujo de orificio, el limitador de flujo del orificio es un accesorio con un agujero muy fino que permite flujo de aire constante a una diferencia de presión dada. En funcionamiento, la alta presión de la botella es reducido a una presión más baja de sólo unos pocos psi, lo que proporciona un flujo de aire constante a través del orificio, las tasas de flujo entre 600-1000 cc/min son las más comunes, los modelos pueden ser equipados con un regulador

de presión ajustable para que la tasa de flujo pueda ser ajustada en consecuencia. Puede obtenerse información detallada sobre el almacenamiento y la duración de la conservación del producto del fabricante. Generalmente, los gases de alta presión de vapor con baja reactividad, como el metano, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, pueden mezclarse con el aire y almacenarse a alta presión. Los gases de baja presión de vapor, como los disolventes de hidrocarburos líquidos, sólo pueden mezclarse con el aire y almacenarse a baja presión. La mayoría de los productos químicos altamente reactivos se mezclan con un nitrógeno de fondo. Con ciertos sensores, como los de estado sólido, si la mezcla del gas es en el aire o en el fondo de nitrógeno afectará dramáticamente la lectura del sensor.



**Figura 4-1.:** Sistema de calibración alphasense.[2]

Tres electrodos en un sensor de gas tóxico

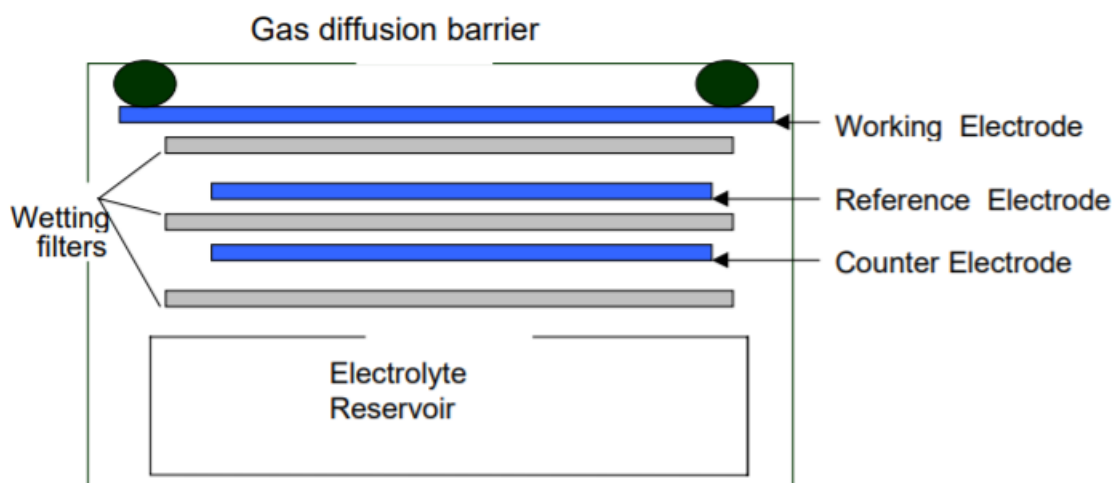
El electrodo de trabajo (también llamado electrodo sensorial) está diseñado para optimizar la oxidación o reducción del gas tóxico a medir, este electrodo permite que el gas entre en contacto tanto con el electrocatalizador como con el electrolito para crear una interfaz trifásica de gas, líquido y sólido, los otros dos electrodos de la célula, el contraelectrodo y el de referencia suelen tener una composición química similar a la del electrodo de trabajo, en los sensores alphasense, los tres electrodos están apilados paralelamente entre sí, como lo ilustrado en la figura 4-2.

El electrodo de trabajo es la superficie donde se produce la oxidación electroquímica ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ) o la reducción ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ). Se utiliza un catalizador de alta superficie para optimizar el rendimiento del sensor, lo que da como resultado una alta capacitancia del sensor: típicamente de 50 a 200mF, lo que lleva a la susceptibilidad a la interferencia electromagnética. Este electrodo está expuesto al aire exterior, por lo tanto está directamente expuesto a todos los gases del aire, incluido el gas que se va a medir. Por lo tanto, este

electrodo puede envenenarse si se expone a ciertos gases que se adsorbe el catalizador (por ejemplo, acetileno en los sensores de CO) o que reaccionan creando subproductos que inhiben el catalizador (por ejemplo, NO<sub>2</sub> o aromáticos en los sensores de H<sub>2</sub>S).

El contraelectrodo equilibra la reacción del electrodo de trabajo, si el electrodo de trabajo oxida el gas, entonces el contraelectrodo debe reducir alguna otra molécula para generar una corriente equivalente, en el sentido opuesto, ejemplo si el monóxido de carbono se oxida en el electrodo de trabajo, el oxígeno se reduce en el contraelectrodo.

Los sensores de gases tóxicos alphasense son sistemas de tres electrodos, incluyen un tercer electrodo, el de referencia, este electrodo de referencia ancla el potencial del electrodo de trabajo para asegurar que siempre esté funcionando en la región correcta de la curva de corriente. Es importante que el electrodo de referencia tenga un potencial estable, manteniendo el electrodo de trabajo en el potencial electroquímico correcto para mantener una sensibilidad constante, una buena linealidad y una sensibilidad mínima a los gases que interfieren.



**Figura 4-2.:** Esquemático del sensor de gas tóxico electroquímico.[2]

- El electrodo de trabajo responde al gas objetivo, ya sea oxidándolo o reduciéndolo, creando un flujo de corriente que es proporcional a la concentración de gas, esta corriente debe ser suministrada al sensor a través del contraelectrodo.
- El electrodo de referencia es utilizado por el circuito potencioestático para mantener un potencial fijo en el electrodo de trabajo. El potencial del electrodo de trabajo debe mantenerse al mismo potencial que el potencial del electrodo de referencia para los sensores no sesgados, o con una compensación para los sensores que requieren sesgo.
- El contraelectrodo completa el circuito con el electrodo de trabajo, reduciendo algunas especies químicas (normalmente oxígeno) si el electrodo de trabajo se está oxidando el electrodo de trabajo está reduciendo el gas objetivo. El potencial del contraelectrodo

se deja flotar, a veces cambiando a medida que aumenta la concentración de gas. El potencial del contraelectrodo no es importante, siempre y cuando el circuito del potenciostato pueda proporcionar suficiente voltaje y para mantener el electrodo de trabajo al mismo potencial que el electrodo de referencia.

La sensibilidad de los sensores de gases tóxicos es variable, típicamente 15 %. Así que se debe calibrar en el software para corregir las variaciones de sensibilidad entre los sensores. Alphasense mantiene una base de datos de la sensibilidad de cada sensor probado en sus laboratorios, la sensibilidad se irá reduciendo con el tiempo, típicamente del 0,5 % al 2 % por mes, dependiendo del tipo de sensor, la humedad relativa y las condiciones de concentración y temperatura del gas.

$$Y = \frac{(WE - WE_T) - (AE - AE_T)}{S_T} \quad (4-1)$$

Donde Y es la relación de mezcla del gas objetivo medida por el sensor en unidades de ppb. WE (electrodo de trabajo) y AE (electrodo auxiliar) son la señal medida en milivoltios (mV) para los dos electrodos, WET y AET son el desplazamiento total del cero de WE y AE (mV), respectivamente, que corresponden a las señales registradas durante la calibración del cero. El último parámetro ST, es la sensibilidad total del sensor (mV/ppb). WET, AET y ST fueron proporcionados por el fabricante del sensor. Con estas pruebas podemos evaluar la fiabilidad de los parámetros de calibración (incluida la información de interferencia cruzada para el sensor de CO y NO2) proporcionados por el fabricante del sensor y, de ser necesario, generar nuevos factores de corrección.

```
NO2WemV = (analogRead(NO2_WE) * (vin / 1023.0)) - ElecZero_NO2_WE_mV;
NO2AemV = (analogRead(NO2_AE) * (vin / 1023.0)) - ElecZero_NO2_AE_mV;
ppb_NO2=(NO2WemV - NO2AemV)/(NO2_Sensitivity);

COWemV = (analogRead(CO_WE) * (vin / 1023.0)) - ElecZero_CO_WE_mV;
COAemV = (analogRead(CO_AE) * (vin / 1023.0)) - ElecZero_CO_AE_mV;
ppb_CO=(COWemV - COAemV)/(CO_Sensitivity);
```

**Figura 4-3.:** Calibración de los sensores de CO y NO2 en software Arduino.(Autor)

Datos de calibración de sensores				
Referencia	Ganancia (mV/nA)	Sensibilidad (mV/ppb)	Electronic ze- ro WE (mV)	Electronic ze- ro AE (mV)
CO B4	0.8	0.530	349	332
NO2 B4	-0.73	0.226	234	225

**Tabla 4-1.:** Datos de calibración de fabricante. [2]

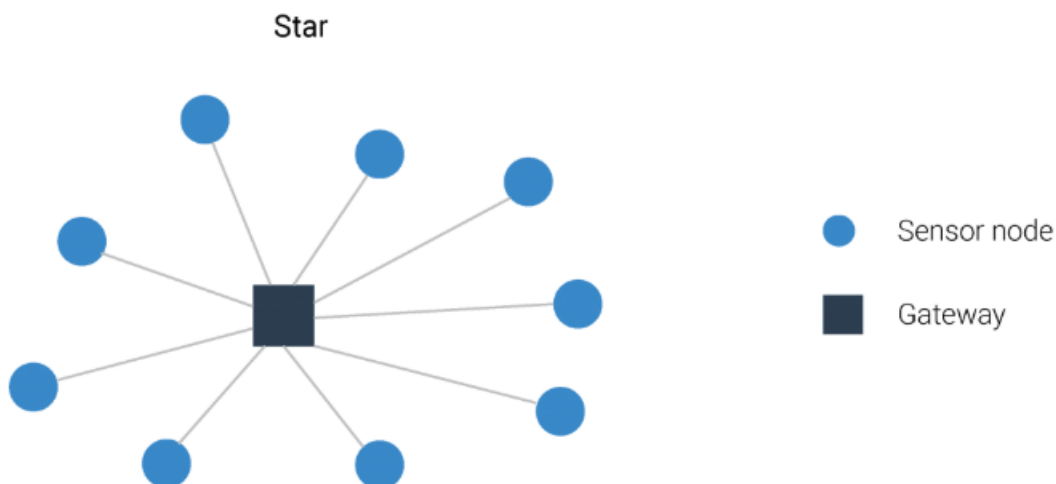


## 5. Resultados

Se realizó el monitoreo de la calidad del aire en dos puntos a través de una red IoT tipo estrella, las redes de malla no son la única forma de resolver las necesidades de redes de baja potencia para aplicaciones de IoT. De hecho, la mayoría de las tecnologías de redes de área amplia y baja potencia (LPWAN), además de WiFi y redes celulares, utilizan una topología de red en estrella. Una red en estrella tiene un enrutador o punto de acceso en el centro que se conecta a todos los terminales o nodos.

La ventaja de la topología en estrella es que toda la complejidad de la red se dirige a un nodo central, de modo que todos los demás nodos sólo necesitan comunicarse en su intervalo de tiempo o frecuencia. La forma en que se comunican depende de si la multiplexación inalámbrica se realiza a través del acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), el acceso múltiple por división de tiempo (TMA) o el acceso múltiple por división de código (CDMA).

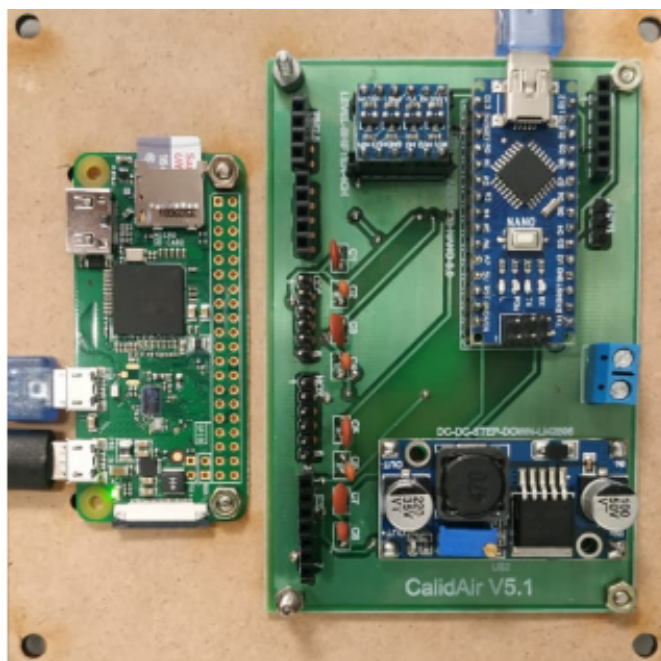
La principal desventaja de la topología en estrella es que el enlace de radio entre la puerta de enlace y el nodo final o terminal puede ser muy largo, lo que significa que cuanto más lejos esté un nodo de la puerta de enlace, más energía tiene que gastar en la transmisión de un mensaje. Pero a diferencia de un nodo de malla que tiene que estar constantemente "despierto", los nodos estelares son capaces de descansar entre las transmisiones de los mensajes, ayudando a conservar la cantidad total de energía gastada por cada nodo.



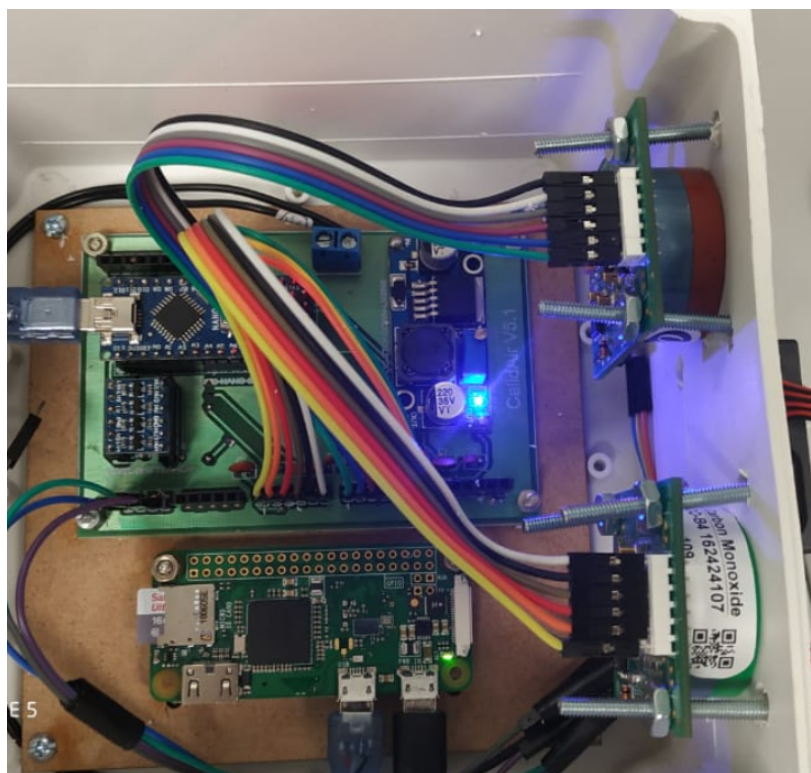
**Figura 5-1.:** Topología estrella.[2]

En cuanto al diseño electrónico de la tarjeta electrónica se aplicaron las normas del IPC, son una herramienta guía de las mejores prácticas de diseño, fabricación, ensamble, inspección de circuitos impresos o PCB (Printed Circuit Board), cables, conectores, insumos de soldadura, pruebas, al aplicarlas ayudan a alcanzar altos niveles de calidad.

En la tarjeta se tuvo en cuenta el ancho de los caminos según la corriente que pasa por los circuitos, distancias entre pistas, tamaños de los hole, las mascarar se generaron para ser las tierras del circuito, la conexión a tierra del bypass de condensadores donde estos condensadores garantizan rápidamente que las corrientes de retorno tengan una ruta muy corta para completar su circuito, también se diseñó el sistema electrónico tomando por separadas las tierras de potencia del módulo y las tierras de adquisición de datos y control dentro del circuito impreso, un buen diseño de conexión a tierras reduce las EMI en los sistemas electrónicos. Las máscaras de tierra puestas en ambas caras del circuito impreso tienen como objetivo en la práctica reducir las EMI irradiadas ya que, al poner áreas grandes del plano de tierra en las máscaras, los planos de tierra actúan como protectores electrostáticos, estas áreas de tierra atrapan las EMI y las disipa dentro de las corrientes de Eddy creadas por la energía electromagnética, se tuvo en cuenta el tipo de conectores adecuado para los sensores , microcontrolador , módulos de comunicación y alimentación, la tarjeta tiene adquisición de los sensores de CO y NO<sub>2</sub> por los pines A0, A1, A2, A3, donde en A0 y A2 adquiere la señal de los electrodos de trabajo de los sensores de alphasense mientras que las entradas A1 y A3 adquieren la señal de los electrodos auxiliares, a través de los puertos de comunicación del microcontrolador se comunican los módulos de comunicación lora donde a través de una comunicación de envío y recepción de datos es posible leer datos de otro módulo que este a menos de 600 metros en línea de vista, el sensor de material particulado esta conectado al módulo de conversor de nivel lógico donde se aumenta el nivel de tensión para ser leído por el microcontrolador y esta señal entra a las entradas 2 y 3 digitales donde en la programación con la implementación de la biblioteca SoftwareSerial la cual se ha desarrollado para permitir la comunicación en serie en otros pines digitales del Arduino, utilizando software para replicar la funcionalidad (de ahí el nombre "SoftwareSerial "). Es posible tener múltiples puertos serie de software con velocidades de hasta 115200 bps, un parámetro habilita la señalización invertida para dispositivos que requieren ese protocolo.



**Figura 5-2.:** PCB y Raspberry pi zero W. (Autor)



**Figura 5-3.:** Módulo de Calidad del aire.(Autor)



**Figura 5-4.:** Interfaz de Calidad del aire. [22]

En cuanto a la calibración de los sensores, una vez tomados los datos de calibración del fabricante al alimentar por primera vez los sensores, según el fabricante hay que darle un tiempo de acondicionamiento de aproximadamente 24 horas, cada vez va disminuyendo los tiempos de acondicionamiento de los sensores, los sensores son ajustados con los datos de calibración dados por el fabricante por medio de la programación donde haciendo la resta entre el valor leído por el microcontrolador y el dado por el datasheet de los valores de los electrodos de trabajo y auxiliar, al dividir estos en la sensibilidad se obtiene el valor del sensor en ppb, los valores vistos en la plataforma correspondientes a CO y NO2 están graficados con respecto a ppb y el tiempo. Como tal en la plataforma es posible observar los últimos valores tomados de cada uno de los sensores, además de la grafica en el tiempo de cada una de las mediciones, al acceder a los dispositivos es posible visualizar las variables del módulo, la localización GPS del dispositivo como se ve en la figura 5-5, acceder a cada una de las variables y ver sus correspondientes gráficas individuales y la base de datos con el almacenamiento del valor de cada una de las variables, hora y fecha en la cual fue tomado el dato.

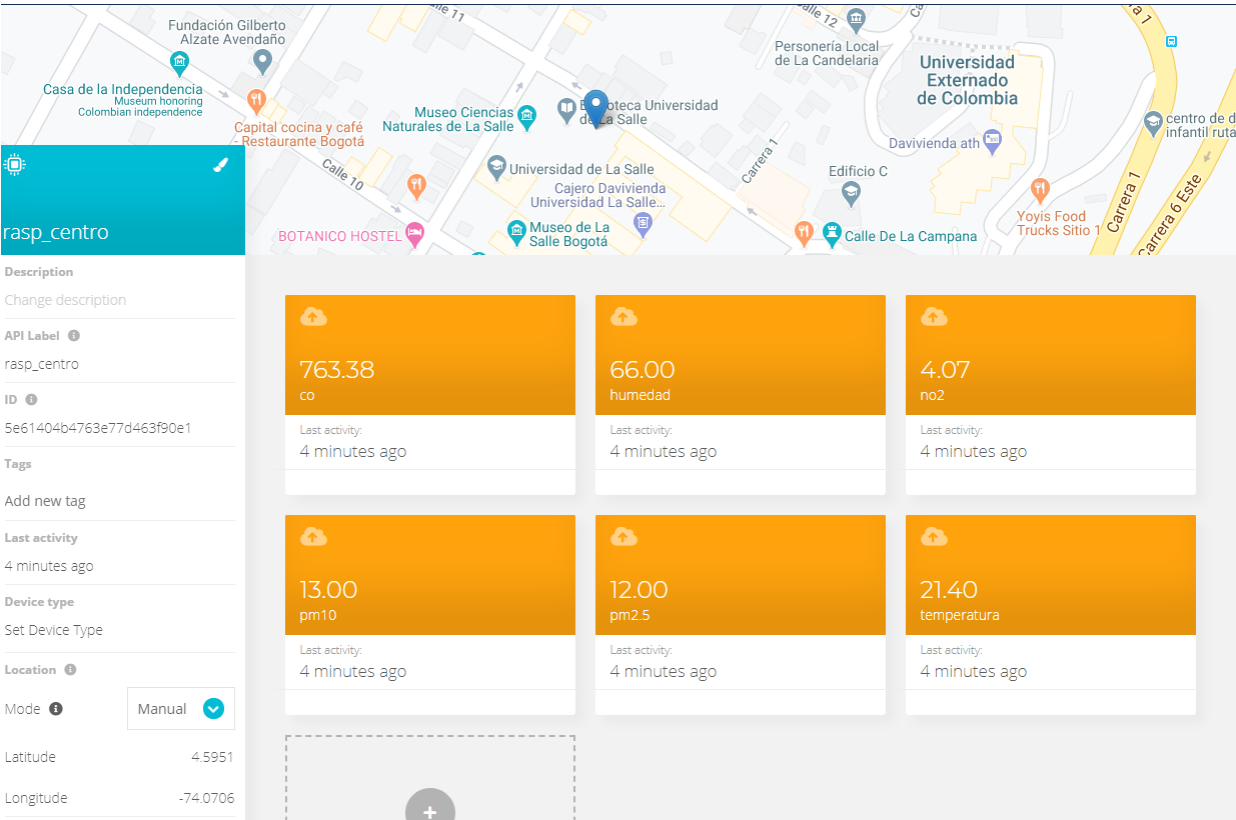
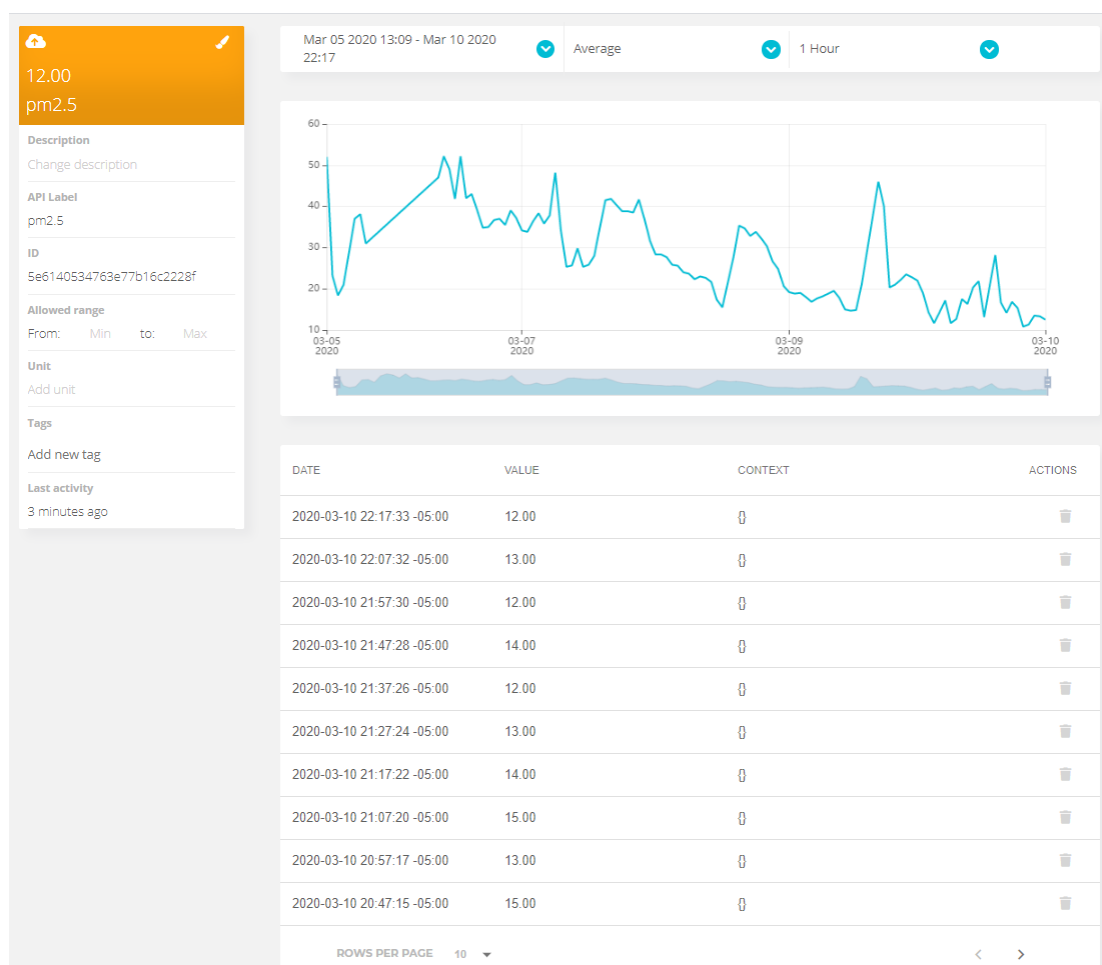


Figura 5-5.: Dispositivo ubicado en la Universidad de La Salle. [22]



**Figura 5-6.:** PM 2.5 Graficas y base de datos. [22]

Como se puede apreciar en la figura 5-4 los valores de los sensores y los valores graficados corresponden a la concentración del contaminante monitoreado por el módulo, los sensores de CO y NO<sub>2</sub>, tienen sensibilidad en ppb (partes por billon), mientras el sensor de material particulado arroja datos en métrica de  $ug/m^3$  la resolución del dato del sensor corresponde a  $1\text{ }ug/m^3$ .

Como complemento fue necesario aplicar la Resolución normativa del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible número 2254 del primero de noviembre del año dos mil diecisiete, en la cual se adopta la norma de calidad del aire del ambiente, teniendo en cuenta las afectaciones de la calidad del aire en la salud y bienestar humano, fijando rangos de caracterización de la contaminación del aire.

El índice de calidad del aire(ICA) 5-7 es un valor adimensional para reportar el estado de la calidad del aire en función de un código de colores y las afectaciones que tiene sobre la salud, teniendo en cuenta las altas concentraciones de los contaminantes a la cual es expuesta la población, a través de la siguiente formula se halla el ICA de las mediciones donde se tiene en cuenta el rango del índice, los rangos de la concentración y la concentración tomada en

el momento por el módulo.

$$ICA = \frac{(I_{Alto} - I_{Bajo})}{PC_{Alto} - PC_{Bajo}} * (C_p - PC_{Bajo}) + I_{Bajo} \quad (5-1)$$

Donde:

ICA: índice de calidad del aire para el contaminante.

C<sub>p</sub>: Concentración medida por el módulo para el contaminante a medir.

PC alto: Punto de corte mayor o igual de la concentración del contaminante.

PC bajo: Punto de corte menor o igual de la concentración del contaminante.

I Alto: Valor mayor correspondiente al rango del ICA.

I Bajo: Valor menor correspondiente al rango del ICA.

RANGOS ICA	CLASIFICACIÓN	SIGNIFICADO	CO 8H PPM	NO2 1H PPM	PM 2.5 (μG/M^3)	PM 10 (μG/M^3)
0 ≤ ICA ≤ 50	VERDE	Bueno	0,0 4,4	NA	0,0 15,4	0 54
51 ≤ ICA ≤ 100	AMARILLO	Aceptable	4,5 9,4	NA	15,5 40,4	55 154
101 ≤ ICA ≤ 150	NARANJA	Grupos sensibles expuestos	9,5 12,4	NA	40,5 65,4	155 254
151 ≤ ICA ≤ 200	ROJO	Insalubre	12,5 15,4	NA	65,5 150,4	255 354
201 ≤ ICA ≤ 300	MORADO	Emergencia	15,5 30,4	0,65 1,24	150,5 250,4	355 424
301 ≤ ICA ≤ 400	MARRON	Peligroso	30,5 40,4	1,25 1,64	250,5 350,4	425 504

**Figura 5-7.:** Código de colores ICA implementado en el módulo de monitoreo calidad del aire.

Basados en la ecuación del ICA y los datos de la tabla de colores los rangos y concentraciones se procedió a hallar el valor ICA correspondiente para cada contaminante, se halló el ICA para los contaminantes que se pueden observar en la imagen CO, NO<sub>2</sub>, PM 2.5 y PM 10, donde a lo largo del monitoreo de aproximadamente medio mes se ha observado la calidad del aire registrada en los dos dispositivos, módulo Universidad de La Salle y el módulo del portal américas que la calidad del aire en estos dos puntos con respecto al contaminante que más afecta la salud el cual es el PM 2.5, según lo observado en las gráficas y corroborando con los rangos del ICA se ha observado que la calidad del aire en estos dos puntos es crítico generalmente el contaminante que más estuvo en alerta morado, rojo, naranja y amarilla, fue el PM 2.5 raramente se vio en clasificación verde, se puede observar que la calidad del aire es mejor cuando se presentan precipitaciones fuertes y moderadas en los sitios en los cuales están ubicados los módulos como se puede observar en las siguientes graficas.



Figura 5-8.: Monitoreo calidad del aire de contaminante estación Portal Américas.[22]

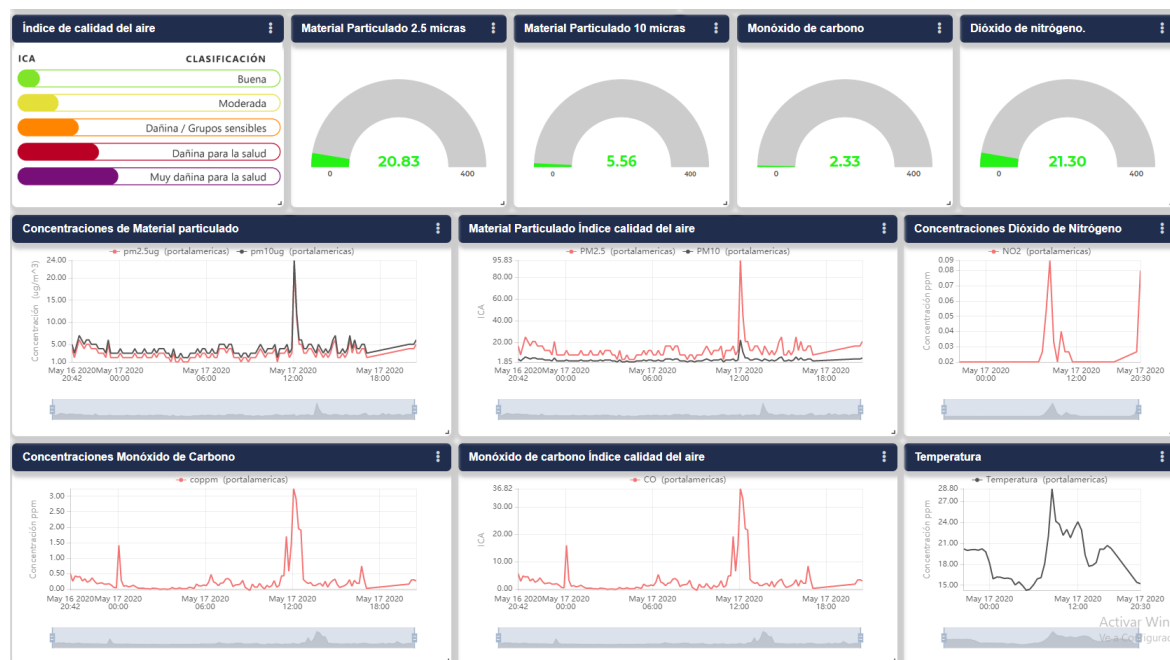


Figura 5-9.: Monitoreo calidad del aire de contaminante estación Portal Américas.[22]

La plataforma web de visualización de los datos de calidad del aire para el módulo de inmediaciones del portal américas, en la figura 5-8 se aprecia en el mapa la opción de al dar clic sobre el pin el desplegable del valor de las variables de calidad del aire medidas, seguido



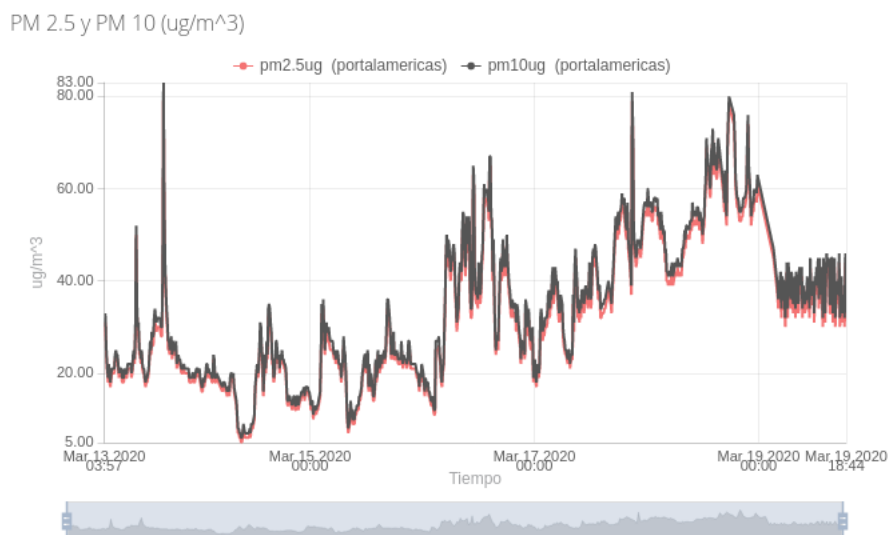
de esto se pueden observar las estadísticas de calidad del aire de la estación de monitoreo de calidad del aire del distrito de Bogotá más cercana (Kennedy) al punto de muestreo, así comparar en la plataforma los valores arrojados por la estación del distrito con el módulo de calidad del aire desarrollado.

En la siguiente figura 5-9, se observa los indicadores cuantitativos de los valores de la calidad del aire según la resolución 2254 de 2017 en la cual se muestra de manera cuantitativa los valores de los contaminantes y de manera cualitativa el índice de la calidad del aire basado en el código de colores, se observa las gráficas de los contaminantes en cuanto a sus valores ICA y la concentración del contaminante.

## 5.1. Monitoreo calidad del aire para contaminante PM 2.5 y PM 10



**Figura 5-10.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante de PM 2.5 según rango ICA, estación Portal Américas.[22]



**Figura 5-11.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante de PM 2.5 y PM 10 según concentración del contaminante, estación Portal Américas.[22]



**Figura 5-12.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante de PM 2.5 según rango ICA, estación Universidad de La Salle.[22]

Material Particulado 2.5 y 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 5-13.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante de PM 2.5 y PM 10 según concentración del contaminante, estación Universidad de La Salle.[22]

En las gráficas correspondiente al PM 2.5 y PM 10 se observa en cuanto a los rangos del ICA y concentración del contaminante en los días de monitoreo de la calidad del aire en inmediaciones del portal américas y de la universidad de La Salle, se obtuvieron diferentes resultados con respecto a la contaminación del aire de estos contaminantes.

En las dos estaciones se puede observar en las figuras **5-10** **5-12** que según el rango del ICA las estaciones han monitoreado máximo hasta alerta Morada para el PM 2.5, esta alerta la cual es estado de emergencia según la resolución 2254 de 2017, se pudo observar que en horas pico la calidad del aire no es la mejor teniendo en cuenta tanto el PM 10 y 2.5 donde debido a los datos arrojados por el módulo y lo investigado en la literatura se evidencia como principal contaminante el PM 2.5 el cual son partículas muy pequeñas en el aire que tiene un diámetro de 2.5 micrómetros (aproximadamente 1 diezmilésimo de pulgada) o menos de diámetro, esto es menos que el grosor de un cabello humano, el material particulado es uno de los seis contaminantes criterio del aire, es una mezcla que puede incluir sustancias químicas orgánicas, polvo, hollín y metales. Estas partículas pueden provenir de los automóviles, camiones, fábricas, quema de madera y otras actividades.

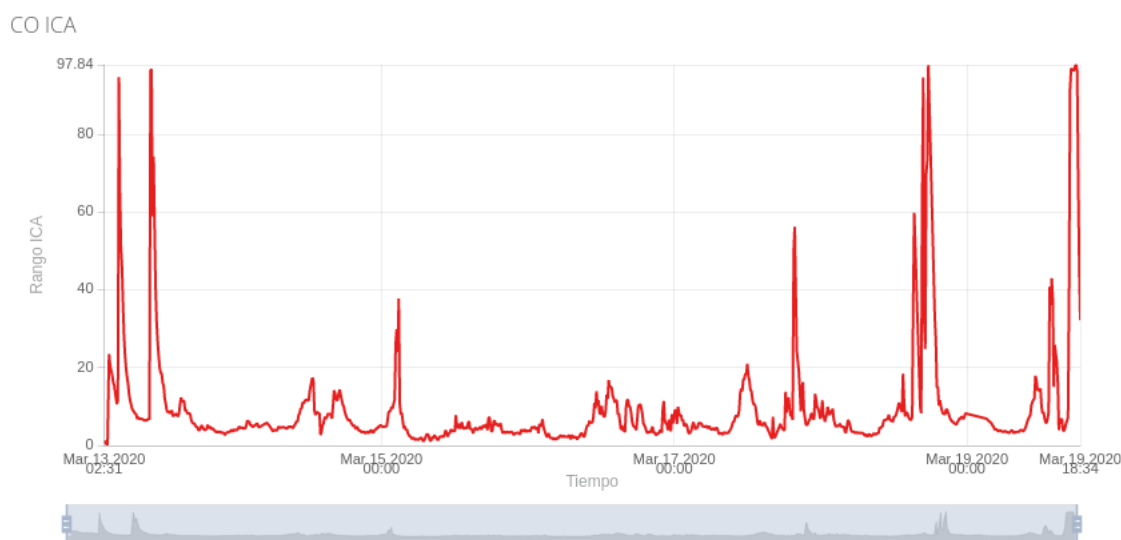
En la estación del portal américas como se puede observar en la gráfica **5-10** la calidad del aire con respecto al PM 2.5 es malo, debido a que estando al lado de un gran foco de contaminación como lo es transmilenio, las inmediaciones de la AV ciudad de Cali y la AV Villavicencio, debido a la gran afluencia de vehículos (motos, automóviles, buses, camiones y tractomulas), se ve de esta manera el gran incremento en la concentración de este contaminante y las correspondientes alertas amarilla, naranja, roja y morada, donde en el average del estudio la contaminación del PM 2.5 a lo largo del monitoreo se mantuvo en alerta naranja y roja.

En cuanto a la estación de la Universidad de La Salle se pudo observar que la calidad del aire es mejor, aunque presenta altos índices de contaminación de la calidad del aire en cuanto al PM 2.5 como se ve en la figura **5-12**, debido a la influencia de la rosa de los vientos y la

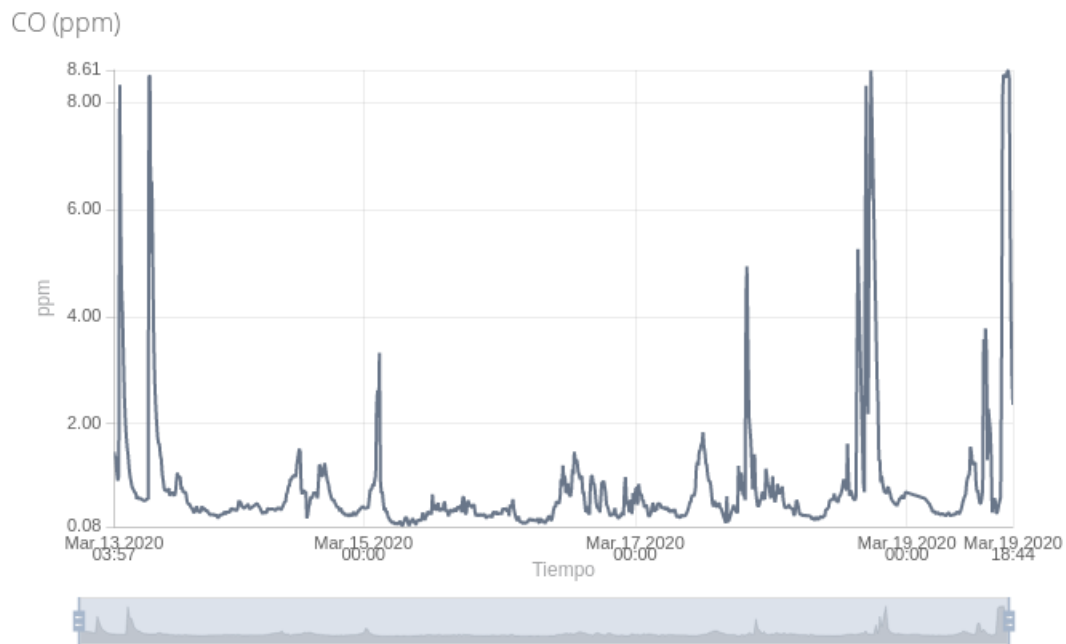
cercanía a los cerros la estación monitorea índices de mejor calidad del aire con respecto al PM 2.5 en comparación a la estación del portal américas, en esta estación se pudo observar que también se llega a alerta morada rara vez, generalmente la clasificación de la calidad del aire mantiene entre alerta amarilla y naranja en días fines de semana y en el caso del pico y placa ambiental se registró una calidad del aire buena y en horas pico, moderada según el rango del ICA.

En cuanto al PM 10 la contaminación atmosférica por material particulado es la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre (causas antropogénicas), se observó que según los rangos del ICA se mantiene generalmente en clasificación verde y amarilla.

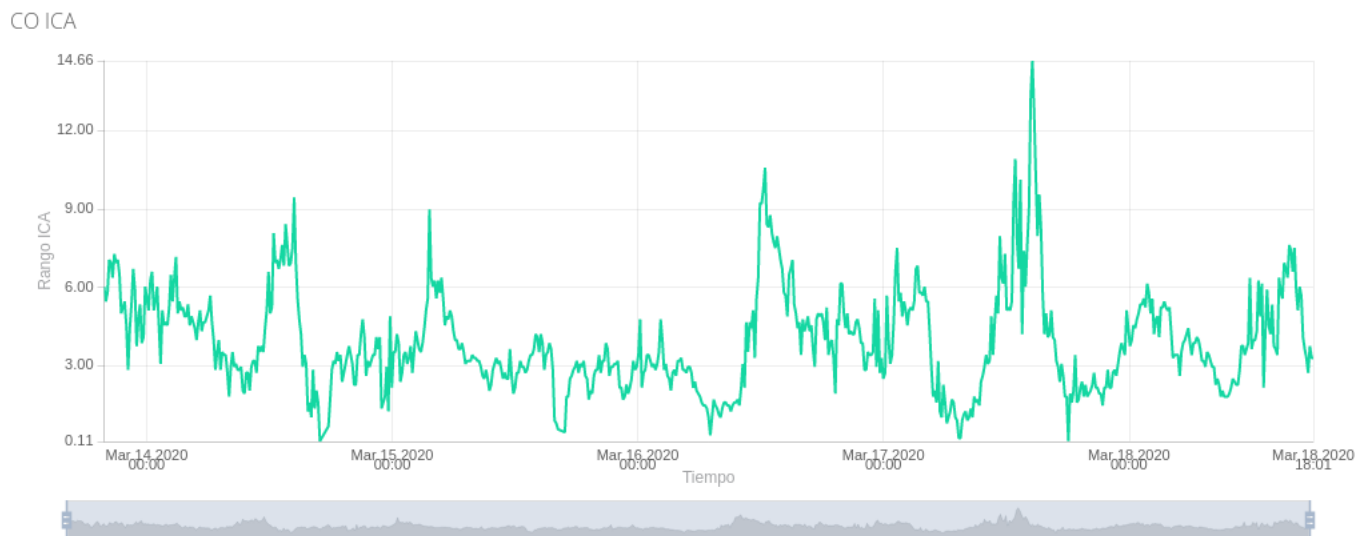
## 5.2. Monitoreo calidad del aire contaminante monóxido de Carbono



**Figura 5-14.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante monóxido de Carbono según rango ICA, estación Portal Américas.[22]



**Figura 5-15.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante monóxido de Carbono según concentración del contaminante, estación Portal Américas.[22]



**Figura 5-16.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante monóxido de Carbono según rango ICA, estación Universidad de La Salle.[22]



**Figura 5-17.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante de monóxido de Carbono según concentración del contaminante, estación Universidad de La Salle.[22]

El monóxido de Carbono (CO) es un gas sin color ni olor emitido como consecuencia de la combustión incompleta de carburantes fósiles y de biocombustibles.

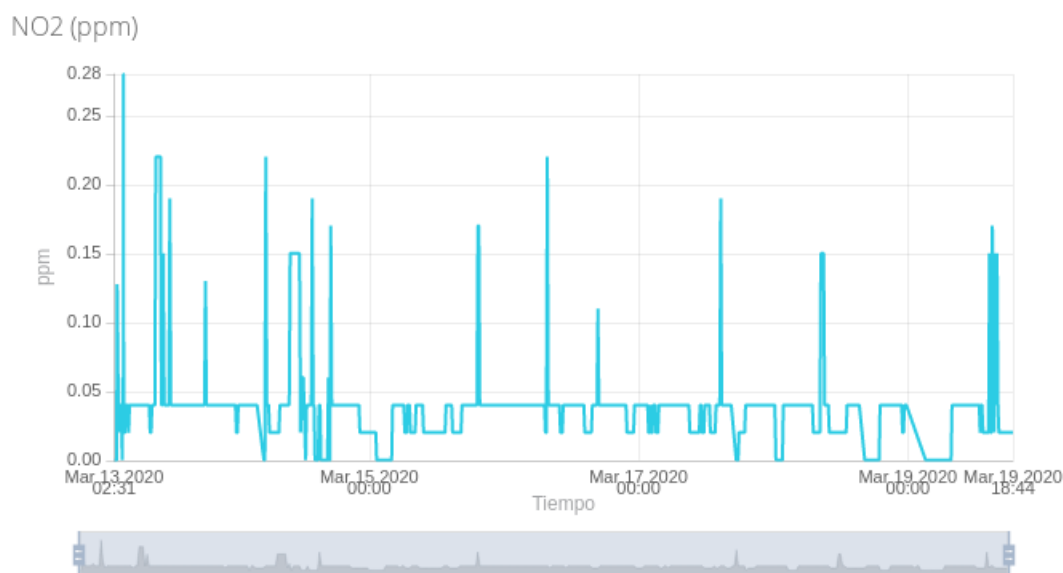
El CO penetra en el organismo a través de los pulmones, y puede provocar una disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, con el consecuente detrimento de oxigenación de órganos y tejidos, así como disfunciones cardíacas, daños en el sistema nervioso, dolor de cabeza, mareos y fatiga; estos efectos pueden producirse tanto sobre el ser humano como sobre la fauna silvestre. También posee consecuencias sobre el clima, ya que contribuye a la formación de gases de efecto invernadero: su vida media en la atmósfera es de unos tres meses, lo que permite su lenta oxidación para formar CO<sub>2</sub>, proceso durante el cual también se genera O<sub>3</sub>.

El CO es considerado uno de los mayores contaminantes atmosféricos, las fuentes móviles son las principales productoras, además las fuentes fijas en las que emplean procesos industriales que utilizan carbón, como se puede apreciar en la figura 5-14 5-15 correspondiente a la concentración y al rango ICA para el CO en la estación de monitoreo de calidad del aire del portal américas se observo el incremento de la concentración del contaminante en ppm en las horas de inicio de operación del portal américas y en las horas pico, en el rango del ICA se observó con respecto a este contaminante en las horas pico las alertas son por máximo en alerta naranja y generalmente en estas horas pico la alerta es amarilla con respecto a este contaminante, en las demás horas del día se mantiene en rango verde el cual no es nocivo para la salud, debido a las diferentes fuentes móviles como lo son cada uno de los buses de Transmilenio y la alta cantidad de tráfico que pasa por la zona se puede observar en las mediciones de la estación del portal américas la afectación que tiene sobre la calidad del aire el CO en relación con la estación de la universidad de La Salle.

En cuanto a la estación de monitoreo de calidad del aire de la universidad de La Salle se puede apreciar que las concentraciones de CO 5-17 son relativamente muy bajas en comparación con la figura 5-15 de concentración de CO monitoreada en la estación de monitoreo

de la calidad del aire del portal américas, debido a su cercanía a los cerros, los vientos y en comparación con la otra estación aquí las fuentes móviles se presentan en menor cantidad, en cuanto al rango del ICA se observó que mantiene en rango verde **5-16** que hace alusión que en cuanto a este contaminante no representa peligro para la salud en esta zona.

### 5.3. Monitoreo calidad del aire para contaminante dióxido de nitrógeno



**Figura 5-18.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante dióxido de Nitrógeno según concentración del contaminante, estación Portal Américas.[22]



**Figura 5-19.:** Monitoreo calidad del aire de contaminante de dióxido de Nitrógeno según concentración del contaminante, estación Universidad de La Salle.[22]

### 5.3 Monitoreo calidad del aire para contaminante dióxido de nitrógeno 67

El NO<sub>2</sub> presente en el aire de las ciudades proviene en su mayor parte de la oxidación del NO, cuya fuente principal son las emisiones provocadas por los automóviles. Por otro lado, el NO<sub>2</sub> interviene en diversas reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera, dando lugar tanto a la producción de ozono troposférico como de partículas en suspensión secundarias menores de 2,5 micras (PM<sub>2,5</sub>), las más dañinas para la salud. De modo que a la hora de considerar los efectos del NO<sub>2</sub> sobre la salud se deben tener en cuenta no sólo los efectos directos que provoca, sino también su condición de marcador de la contaminación debida al tráfico y su condición de precursor de otros contaminantes.

El Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es uno de los causantes de la famosa lluvia ácida, ya que al reaccionar con el vapor de agua produciría ácido nítrico. Los efectos sobre la agricultura, la ganadería, los bosques, los suelos y las aguas son devastadores.

Lo observado en el monitoreo de este contaminante en las figuras **5-18 5-19** en las dos estaciones de medición de calidad del aire que este contaminante medido en ppm por lo general se mantiene en un rango bueno el cual tiene efectos mínimos en la salud y esta por debajo de 0.1ppm, en algunos picos que se presentan en las gráficas se puede observar que superan los 0.1 ppm **5-18**, pero mientras se encuentre en un rango menor a 5ppm es moderado, en el cual puede producir algunos efectos negativos para la salud en poblaciones vulnerables, la concentración de este contaminante es mas alta en la estación de monitoreo de calidad del aire del portal en americas donde ha presentado picos superiores a 0.1 ppm mientras en la estación de monitoreo de la universidad de La salle según la concentración vista durante el monitoreo el contaminante no afecta de una forma severa la calidad del aire **5-19**.



#### 5.4. Influencia de la temperatura y humedad relativa en la calidad del aire

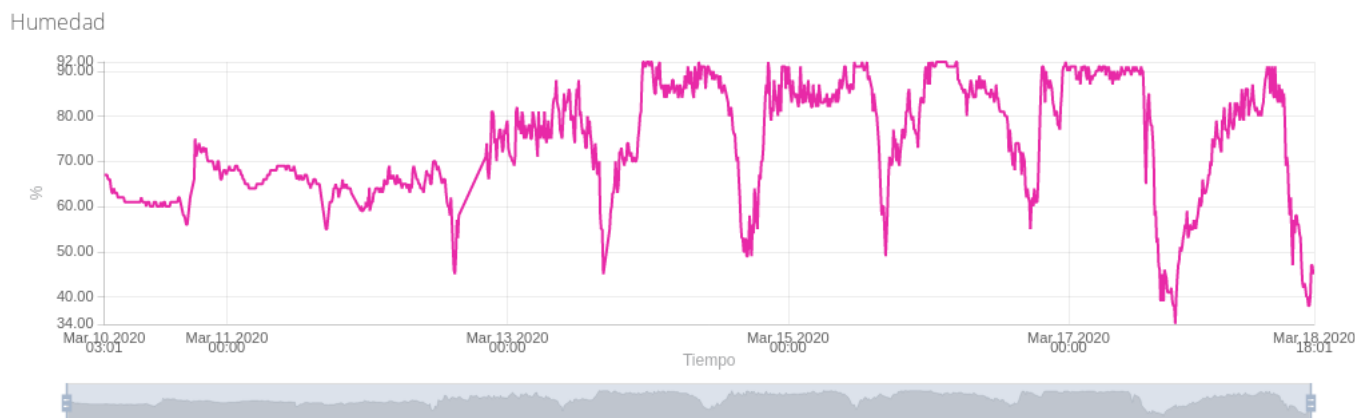


**Figura 5-20.:** Humedad relativa del aire, estación Portal Américas.[22]

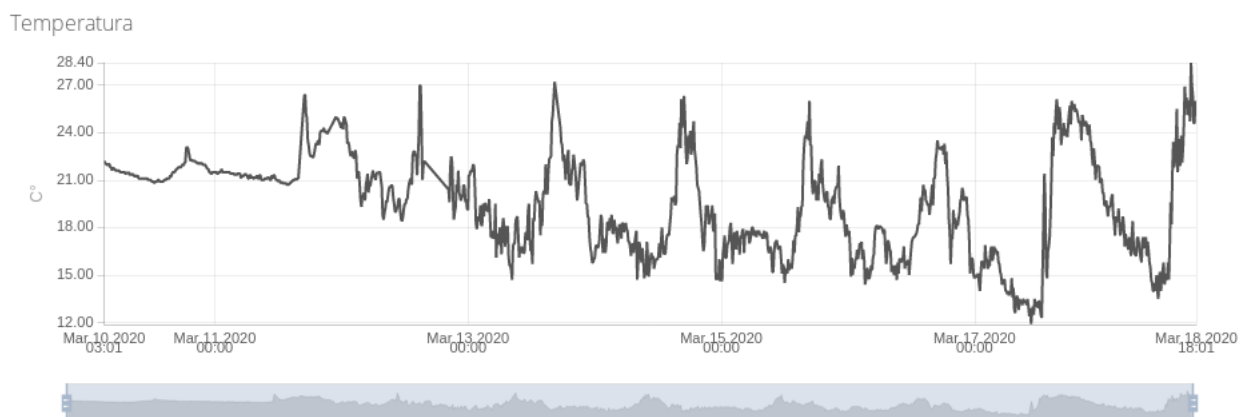


**Figura 5-21.:** Temperatura, estación Portal Américas.[22]

#### 5.4 Influencia de la temperatura y humedad relativa en la calidad del aire



**Figura 5-22.:** Humedad, estación Universidad de La Salle.[22]



**Figura 5-23.:** Temperatura, estación Universidad de La Salle.[22]

La concentración de contaminantes en el aire ambiente se rige por los parámetros meteorológicos, como la velocidad del viento atmosférico, la dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura.

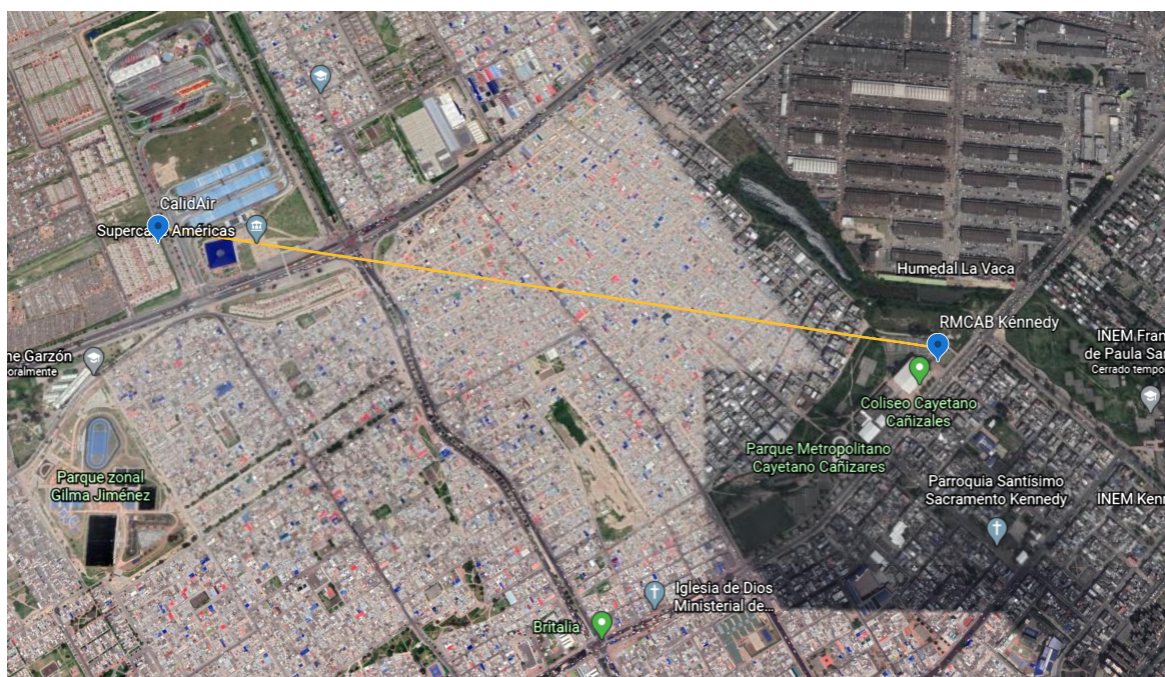
Estos hallazgos indican que la influencia de la temperatura en el contaminante gaseoso ( $\text{NO}_2$ ) es mucho más durante el fenómeno del niño, debido al rango de temperatura es más alto, pero en el caso del material particulado la correlación se encontró contradictoria. Siendo el fenómeno de la niña el proceso más eficiente para la eliminación del material particulado, no solo durante la lluvia también durante un periodo después de las lluvias, debido a que se dan procesos de resuspensión del material particulado, las correlaciones muy débiles a moderadas que existen entre la temperatura y la concentración de contaminantes ambientales durante los fenómenos del niño y niña indican algunos comportamientos en la calidad del aire.

En las figuras **5-20**, **5-21**, **5-22**, **5-23** se puede apreciar que a mayor humedad menor temperatura e igualmente en el caso contrario, durante el monitoreo se observó cómo al haber altas temperaturas, el material particulado PM 2.5 y PM 10 por lo general estaba entre rangos ICA morado(toxico), rojos(peligroso) y naranja (peligroso para grupos sensibles) en el caso de las dos estación de monitoreo de calidad del aire, pero con el aumento de la humedad y descenso de la temperatura se pudo observar en un determinado tiempo como descendían estos niveles de concentración a unos niveles más moderados, disminuyendo la concentración de material particulado y aumentando la concentración de NO<sub>2</sub> debido a la oxidación que se produce dentro del ambiente.

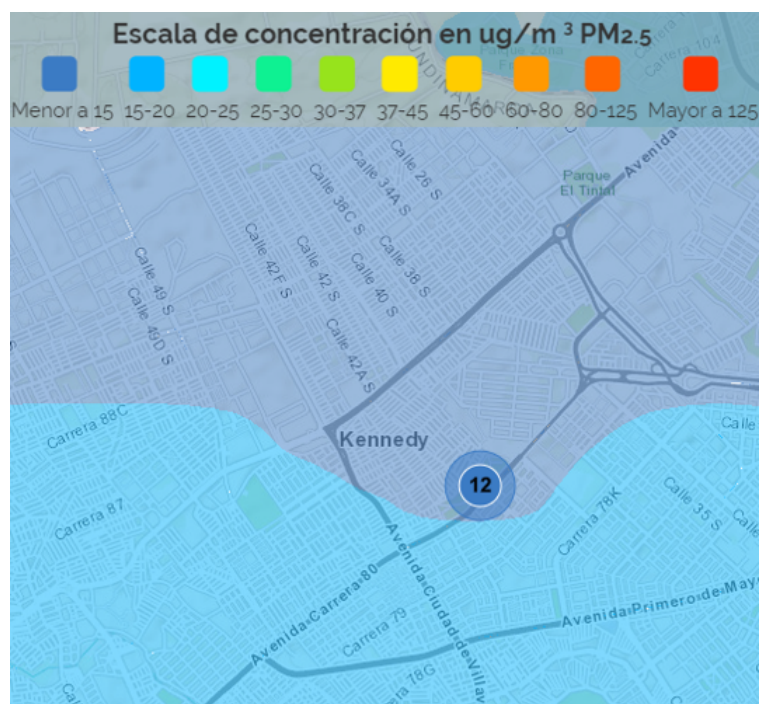
## 5.5. Validación módulo de calidad del aire

El proceso de validación relativa del módulo de calidad del aire implicó la comparación de los datos obtenidos por el módulo de calidad del aire, se compararon los contaminantes: Material particulado 2.5, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno, con las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) teniendo en cuenta la estación más cercana a la ubicación del punto de muestreo.

Teniendo en cuenta la dispersión de los contaminantes según los mapas registrados por el RMCAB **5-25** y la ubicación de la estación de calidad del aire del distrito en comparación con el módulo desarrollado, el punto de muestreo se encuentra aproximadamente a 1.6 km lineales **5-24** de distancia a la estación de referencia, se realizó la comparación de los datos de calidad del aire por hora en un periodo de muestreo de 3 días.



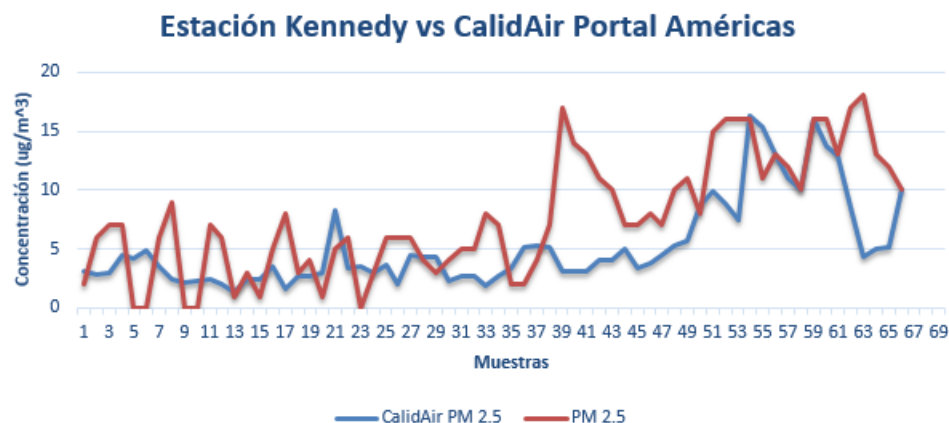
**Figura 5-24.:** Distancia lineal entre el punto de muestreo y estación de referencia.(Autor)



**Figura 5-25.:** Mapa de dispersión de contaminantes en la zona de Kennedy.[20]

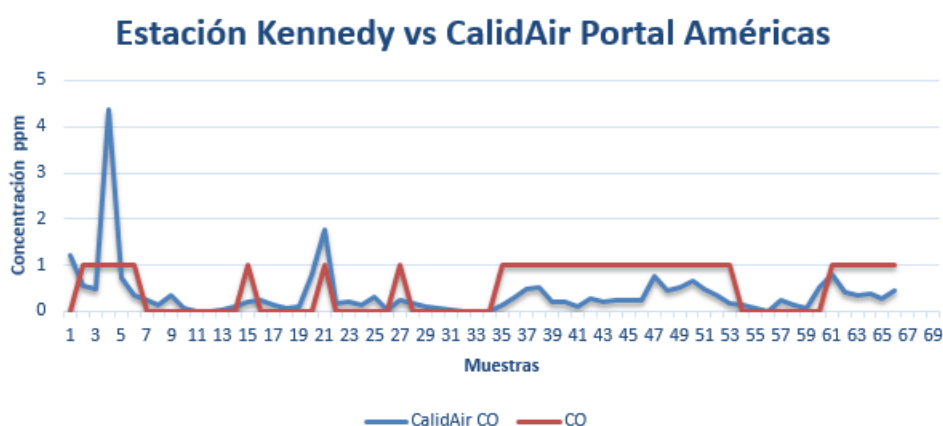
Tomados los datos durante 3 días se procede a realizar el análisis de los datos referencia (datos tomados del RMCAB) con respecto a los datos tomados por el módulo de calidad

del aire diseñado, con el objetivo de conocer la exactitud del módulo se graficaron los datos tomados por el módulo vs los datos de referencia del RMCAB.



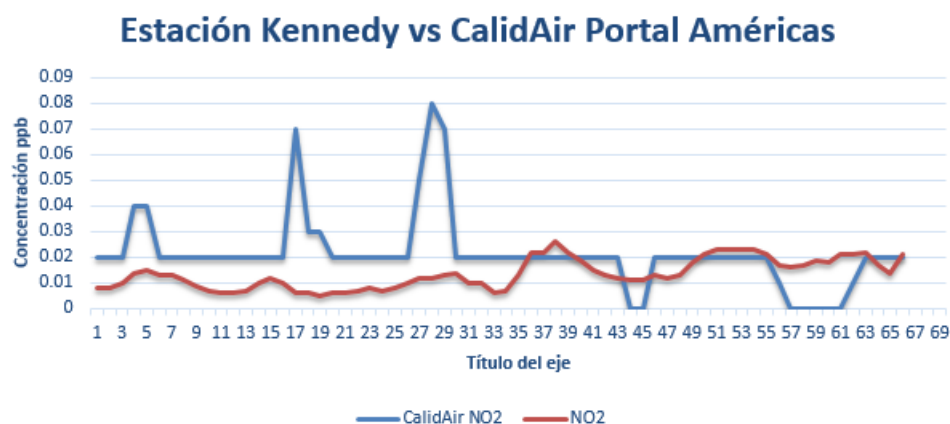
**Figura 5-26.:** Comparación material particulado tomado por el módulo vs RMCAB Kennedy.(Autor)

Como se observa en la gráfica **5-26** los valores tomados por el módulo de calidad del aire con respecto al contaminante de material particulado que tiene una mayor diferencia en la medición entre el módulo y la estación Kennedy, debido a las diferentes fuentes de contaminación que se encuentran en las zonas de análisis, un ejemplo muy claro es la ubicación del módulo, esta en inmediaciones a una fuente de contaminación como lo es el portal américas y la avenida Ciudad de Cali, mientras la estación RMCAB Kennedy presenta mayores concentraciones de PM 2.5 ya que se encuentra próxima a la central de abastos y la avenida Cra 80, zonas caracterizadas por el alto flujo vehicular especialmente vehículos de carga pesada los cuales son una de las fuentes que más contribuye al aumento del material particulado.



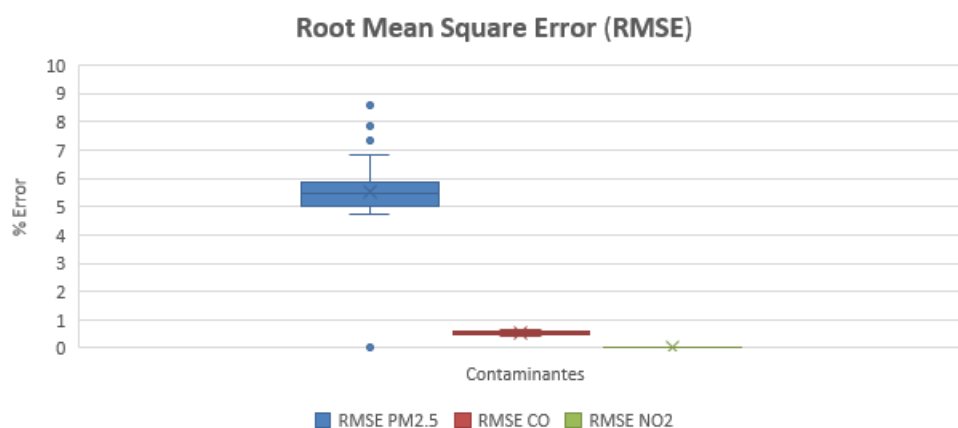
**Figura 5-27.:** Comparación monóxido de carbono tomado por el módulo vs RMCAB Kennedy.(Autor)

Con los datos observados en la gráfica 5-27 se puede apreciar la medición de la concentración de monóxido de carbono en el área, se observó que la resolución es de 1 ppm del sensor utilizado en la estación RMCAB Kennedy, el sensor utilizado en el módulo diseñado tiene una resolución de 2ppb, se aprecia la diferencia en algunas de las mediciones.



**Figura 5-28.:** Comparación dióxido de nitrógeno tomado por el módulo vs RMCAB Kennedy.(Autor)

En esta gráfica 5-28 se puede apreciar el comportamiento del NO2 con respecto a las mediciones de las dos estaciones en contexto, donde debido a las diferentes fuentes fijas y móviles que se presentan en las áreas circundantes, hay una diferencia entre ellas con respecto a las concentraciones, teniendo un alto grado de similitud en cuanto a la dispersión de este contaminante en el área de muestreo.



**Figura 5-29.:** Validación del módulo de calidad del aire por RMSE.(Autor)

Con el error cuadrático medio se determinó el error que hay entre los dos conjuntos, donde se comparó los valores de concentración de los contaminantes obtenidos por el módulo con valores de referencia de concentración de los mismos contaminantes obtenidos de RMCAB



Kennedy, el efecto del RMSE es proporcional al tamaño del error cuadrado por tanto los errores dentro de la medición del error entre los contaminantes es sensible a los valores atípicos, siendo el RMSE una medida para hallar la precisión en la comparación de errores de los conjuntos de datos en particular dependientes de una escala.

Siendo el RMSE promedio del comportamiento de las diferencias en comparación de los contaminantes a lo largo del periodo de muestreo, en el caso del material particulado el RMSE promedio es del 5.5 %, para monóxido de carbono corresponde al 0.53 % y para el dióxido de nitrógeno del 0.013 %, estos valores fueron los esperados debido al porcentaje de error de los sensores, en el caso del sensor de material particulado el cual tiene un porcentaje de error del 5 %, donde se tuvo en cuenta las diferencias para las mediciones en tiempo real y a lo largo del día, además de tener en cuenta que las tendencias variantes ante factores como las fuentes de contaminación y los horarios pico de flujo vehicular en las zonas.

Debido al momento actual (pandemia Covid-19) presentado en la ciudad y el mundo no fue posible trasladar el equipo a la misma zona para realizar la validación del equipo en el mismo punto de la estación RMCAB Kennedy, las diferencias vistas con el RMSE presentados anteriormente permiten ver la relatividad del comportamiento del equipo en cuanto a las tendencias de los contaminantes mas no como patrón final de calibración del módulo, no se habla de error debido a que seria dentro de el marco de la validación real con respecto a la misma ubicación de la estación RMCAB Kennedy bajo las mismas condiciones de operación, por tanto se dice que el módulo fue comparado bajo las diferencias vistas a través del RMSE de los contaminantes.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

- El cumplimiento de los objetivos propuestos, permitió diseñar e implementar un prototipo funcional de medición de contaminantes que afectan la calidad del aire (PM 2.5, PM 10, CO, NO<sub>2</sub>), con módulos que permiten la toma de los datos cada 10 minutos, dichos datos son llevados al sistema de información web donde los datos de cada una de las variables monitoreadas son almacenados, graficados y visualizados en el panel de control. En el sistema de información, se observa la conexión de los dispositivos como se observó en la figura **3-6**, el cual clasifica los datos por dispositivo; cada dispositivo es posible ser ubicado con el sistema GPS a través de la localización de la conexión de internet de las Raspberry Pi. Adicionalmente, en la configuración del servidor web, se puede establecer roles, accesos de usuario **3-15** y administrador **3-14**. El administrador puede crear diferentes tipos de alerta dentro de los eventos, donde si alguna variable supera el umbral de contaminación durante un determinado tiempo, el servicio web Ubidots enviara vía correo electrónico o SMS las alertas a usuarios y administradores.
- La calibración del equipo requirió el acondicionamiento de señales provenientes de los sensores electroquímicos a través de un bypass de condensadores, los cuales almacenan carga eléctrica que es cedida de la línea de alimentación durante una baja transitoria de la tensión, proporcionando una pequeña alimentación que minimiza el ruido de los sensores electroquímicos generado por la conmutación de las salidas de los sensores.
- En el diseño de la PCB fue necesario complementar conocimientos de la norma IPC 2221 para el diseño de circuitos impresos con respecto a ángulos de las pistas, ancho de las pistas según la corriente consumida por la tarjeta, la conexión a tierra del bypass de condensadores donde estos condensadores garantizan rápidamente que las corrientes de retorno tengan una ruta muy corta para completar su circuito, también se diseñó el sistema electrónico tomando por separadas las tierras de potencia del módulo y las tierras de adquisición de datos y control dentro del circuito impreso, un buen diseño de conexión a tierras reduce las EMI en los sistemas electrónicos. Las máscaras de tierra puestas en ambas caras del circuito impreso tienen como objetivo en la práctica reducir las EMI irradiadas ya que, al poner áreas grandes del plano de tierra en las



máscaras, los planos de tierra actúan como protectores electrostáticos, estas áreas de tierra atrapan las EMI y las disipa dentro de las corrientes de Eddy creadas por la energía electromagnética. Se tuvieron en cuenta las diferentes librerías de los módulos que complementan la tarjeta, los conectores más adecuados para los sensores y módulos del sistema.

- Considerando la influencia de las EMI que pueden afectar los sistemas electrónicos también se tuvo en cuenta el material del contenedor de los sistemas electrónicos, para conseguir un apantallamiento EMI se recomienda que la conductividad del material sea superior a 10-2 Siemens/cm, por tanto los módulos electrónicos diseñados cuentan con una carcasa para productos electrónicos (ordenadores, equipos de comunicación) fabricados habitualmente con material termoplástico, ya que estos materiales presentan unas excelentes propiedades de aislamiento eléctrico, con una conductividad típica menor de 10-14 Siemens/cm.
- Con respecto a la red IoT se implementó una conexión en estrella donde cada uno de los dispositivos se enlaza con el sistema web de Ubidots, para esto fue necesaria la comunicación serial entre el dispositivo arduino y la raspberry pi, a través de la lectura del puerto serial y el diseño de funciones en Python, se realizó el procesamiento de la información adquirida por el arduino, en el procesamiento de la información del módulo se realizó la configuración del sistema para enviar al servidor los datos de los sensores en unidad de concentración de contaminantes para el caso de NO<sub>2</sub>, CO (ppm), PM 10 y PM 2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), temperatura (C°), además de la configuración de los rangos ICA de cada uno de los sensores de calidad del aire, seguido esto se codifica la información en JSON para el empaquetamiento de los datos para el envío al servidor web a través de la url, dentro del servidor estos datos son decodificados con JSON y listos para ser visualizados en el panel de control.
- La actual situación (Covid-19) no permitió la validación del equipo con respecto a una estación patrón, por tanto la validación del equipo se realizó de forma relativa teniendo en cuenta la dispersión de los contaminantes **5-25**, si existieran dichas diferencias observadas con el RMSE promedio de los contaminantes, medir estos datos obtenidos con el módulo en comparación a un equipo patrón para establecer la exactitud y precisión de los módulos diseñados.

## 6.2. Recomendaciones

El sistema de monitoreo de condiciones ambientales a través de redes IoT, realiza el monitoreo de material particulado (PM 2.5 y PM 10), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno

(NO<sub>2</sub>), temperatura(C°) y humedad relativa del aire, como recomendación para completar el modulo en comparación a los módulos profesionales es necesario implementar dentro del sistema la lectura de una estación meteorológica para brindar los datos de precipitación, dirección del viento y la velocidad del viento, esto en cuanto al módulo, en la parte del sistema de información web es necesario crear una página web para la visualización de los datos y con respecto a los valores del rango ICA puedan ser mostrados con el color correspondiente al rango, además de mejorar el entorno grafico del panel de control, teniendo en cuenta que para el acceso de la aplicación realizada es necesario un usuario y su clave, la recomendación es dejar la visualización de los datos de calidad del aire en la página web de una forma libre donde cualquier internauta pueda acceder como usuario a la visualización de estos datos y gráficas. Además se recomienda realizar la validación de la estación de monitoreo con un equipo patrón para así tener en cuenta las diferencias en los datos arrojados por el módulo y el equipo patrón.



## A. Anexo: Datasheet sensores de medición de contaminantes del aire

### Particle Sensor HPM Series

**Table 1. Specifications**

Characteristic	Parameter
Operating principle	laser scattering
Detection <sup>1,2</sup>	PM2.5 and PM10
Output data <sup>1,2</sup>	PM2.5 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and PM10 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Concentration range	0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Accuracy (at 25°C $\pm$ 5°C): 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 15 \%$
Response time	<6 s
Supply voltage	5 V $\pm$ 0.2 V
Standby current (at 25°C $\pm$ 5°C)	<20 mA
Supply current (at 25°C $\pm$ 5°C)	<80 mA
Temperature: operating storage	-10°C to 50°C [-14°F to 122°F] -30°C to 65°C [-22°F to 149°F]
Humidity (operating and storage)	0 %RH to 95 %RH non-condensing
Output protocol <sup>3</sup>	UART; baud rate: 9600, databits: 8, stopbits: 1, parity: no
Operating time: continuous mode intermittent mode	20,000 hr depends on duty cycle
Laser class	Laser Class 1: IEC/EN 60825-1: 650 nm
ESD	$\pm 4$ kV contact, $\pm 8$ kV air per IEC 61000-4-2
Radiated immunity	1 V/m (80 MHz to 1000 MHz) per IEC 61000-4-3
Fast transient burst	$\pm 0.5$ kV per IEC61000-4-4
Immunity to conducted disturbances radiated emissions	3 V per IEC61000-4-6
Radiated emissions	40 dB 30 MHz to 230 MHz; 47 dB 230 MHz to 1000 MHz per CISPR 14
Conducted emissions	0.15 MHz to 30 MHz in compliance with CISPR 14

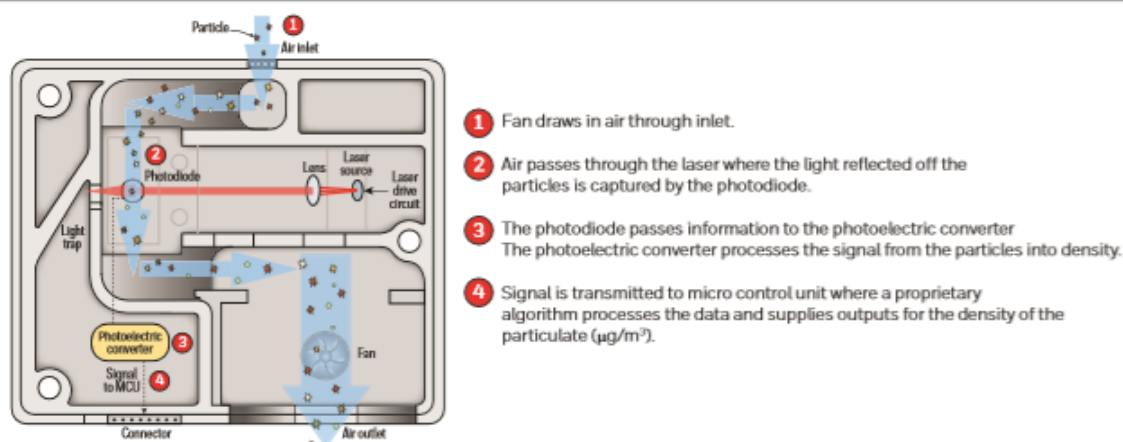
<sup>1</sup> PM2.5 is particulate matter  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  in diameter; PM10 is particulate matter  $\leq 10 \mu\text{m}$  in diameter.

<sup>2</sup> PM10 in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  is calculated from PM 2.5 readings.

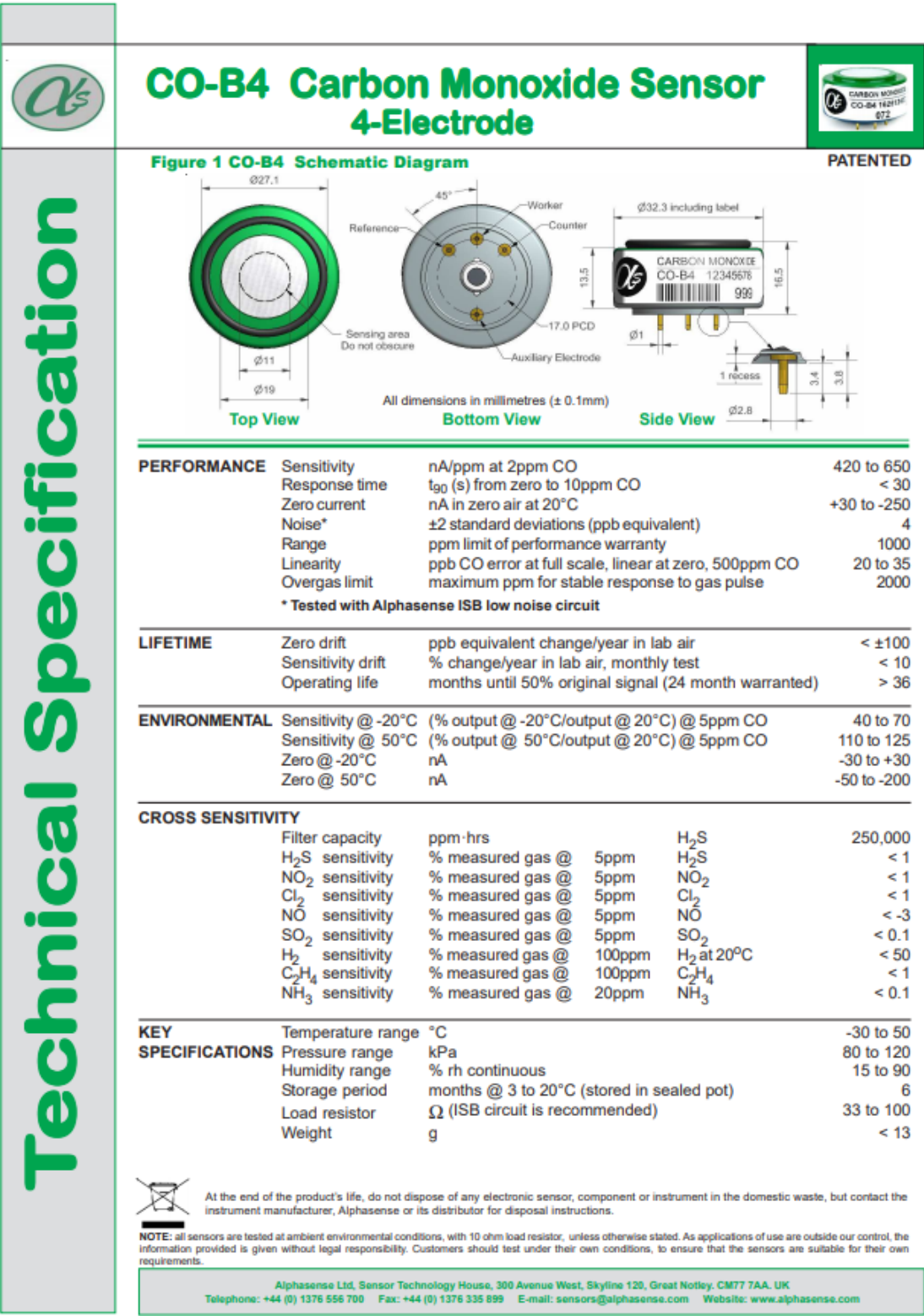
<sup>3</sup> Contact Honeywell for other output options.

**CLASS 1  
LASER PRODUCT**

**Figure 1. HPM Series Operation (Top Down View)**



**Figura A-1.:** Principio de funcionamiento HPMA11S0 y condiciones de trabajo.



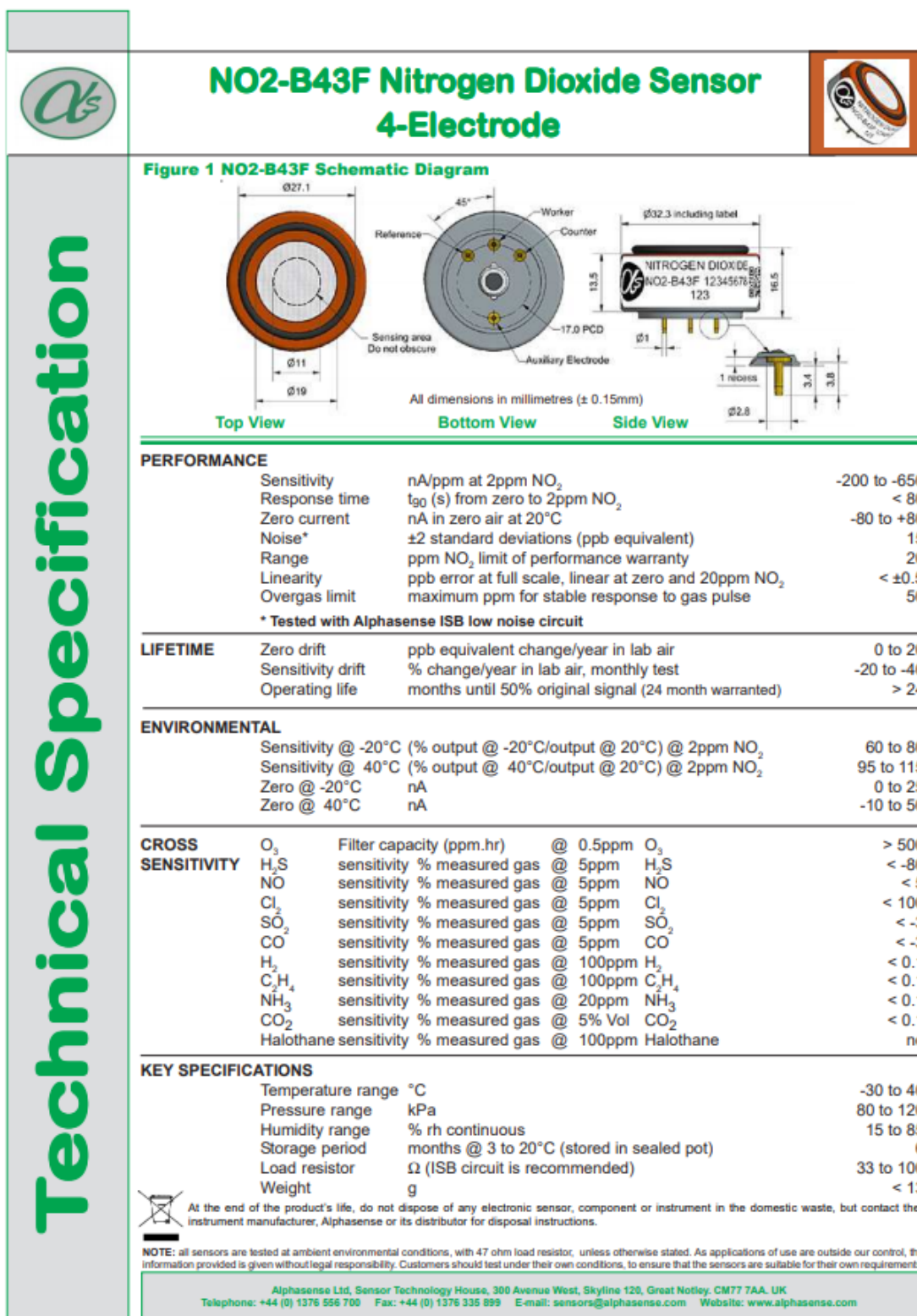


Figura A-3.: Datasheet sensor de dióxido de nitrógeno.



## B. Anexo: Configuración del sistema de información web con raspberry pi.

```

PuertoSerie= serial.Serial('COM4',9600)
PuertoSerie.flush()
cadena = ""
TOKEN = "BBFF-YASUzItjntTlUPzFawvps2lYq0JGZj" # Put your TOKEN here
DEVICE_LABEL = "PortalAmericas" # Put your device label here
VARIABLE_LABEL_1 = "CO" # Put your first variable label here
VARIABLE_LABEL_2 = "NO2" # Put your second variable label here
VARIABLE_LABEL_3 = "HUMEDAD" # Put your second variable label here
VARIABLE_LABEL_4 = "TEMPERATURA" # Put your second variable label here
VARIABLE_LABEL_5 = "PM2.5" | # Put your second variable label here
VARIABLE_LABEL_6 = "PM10" # Put your second variable label here

def build_payload(variable_1, variable_2, variable_3,variable_4, variable_5, v
    # Creates two random values for sending data
    while True:
        arduino = PuertoSerie.readline()
        arduino = str(arduino)[2:]
        arduino = arduino[:-5]

        data = arduino.split('#')

        data = [float(i) for i in data]
        payload = {variable_1: data[0],
                   variable_2: data[1],
                   variable_3: data[2],
                   variable_4: data[3],
                   variable_5: data[4],
                   variable_6: data[5]}
        break

    return payload

```

**Figura B-1.:** Configuración de lectura del puerto serial y definición de función de procesamiento de información.



```
def post_request(payload):
    # Creates the headers for the HTTP requests
    url = "http://industrial.api.ubidots.com"
    url = "{} /api/v1.6/devices/{}".format(url, DEVICE_LABEL)
    headers = {"X-Auth-Token": TOKEN, "Content-Type": "application/json"}

    # Makes the HTTP requests
    status = 400
    attempts = 0
    while status >= 400 and attempts <= 5:
        req = requests.post(url=url, headers=headers, json=payload)
        status = req.status_code
        attempts += 1
        time.sleep(1)

    # Processes results
    if status >= 400:
        print("[ERROR] Could not send data after 5 attempts, please check \
        your token credentials and internet connection")
        return False

    print("[INFO] request made properly, your device is updated")
    return True

def main():
    payload = build_payload(
        VARIABLE_LABEL_1, VARIABLE_LABEL_2, VARIABLE_LABEL_3, VARIABLE_LABEL_4, VAR

    print("[INFO] Attempting to send data")
    post_request(payload)
    print("[INFO] finished")

if __name__ == '__main__':
    while (True):
        main()
        time.sleep(601)
```

Figura B-2.: Empaquetamiento y envío de datos al servidor.

## C. Anexo: Datos de validación calidad del aire módulo vs RMCAB Kennedy

Los reportes generados por la plataforma Ubidots se realizan de forma diaria, semanal y mensual, con estos datos generados por los reportes de Ubidots y los datos tomados del RMCAB Kennedy, se realizó la comparación de los datos de PM 2.5, CO y NO2. Estos reportes son configurados en la plataforma como se aprecia en la figura C-1 donde se configuro el sistema para la muestra de las concentraciones de los contaminantes en promedio por hora, los datos son entregados al usuario en formatos .xls o PDF según lo solicite.

Type:

Name:

+ Add Variable

Device	Variable	Operation	Time
<input type="text" value="CalidAir"/>	<input type="text" value="CO ppm"/>	<input type="text" value="Aver"/>	<input type="text" value="1 Hour"/>
<input type="text" value="CalidAir"/>	<input type="text" value="NO2"/>	<input type="text" value="Aver"/>	<input type="text" value="1 Hour"/>
<input type="text" value="CalidAir"/>	<input type="text" value="PM2.5ug"/>	<input type="text" value="Aver"/>	<input type="text" value="1 Hour"/>
<input type="text" value="CalidAir"/>	<input type="text" value="PM 10 ug"/>	<input type="text" value="Aver"/>	<input type="text" value="1 Hour"/>

Remove Section

**Email settings**

Send this report every  on  at  :  PM

Subject:

Message body:

To the following emails (enter a comma separated list):

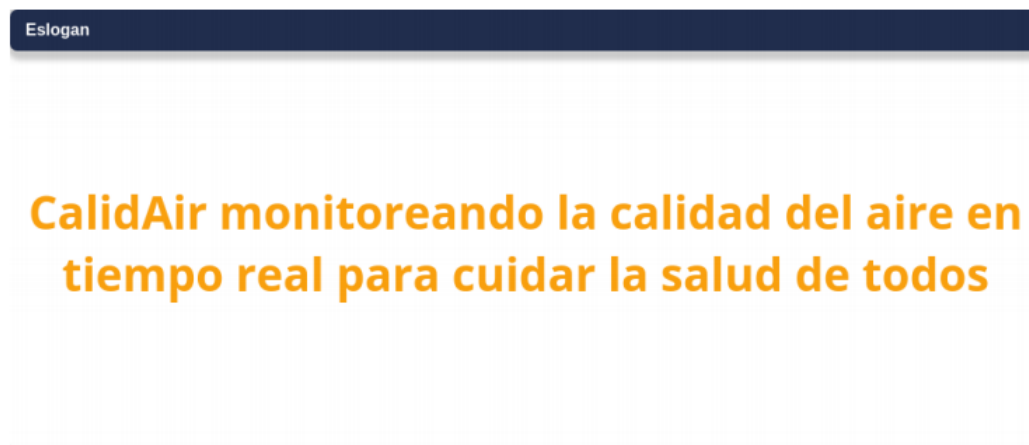
Save report

**Figura C-1.:** Configuración de reportes Ubidots.

### Reporte Semanal PDF

Hour and date: 2020-05-30 23:58:00 -05  
Period: 2020-05-18 00:00:00 -05 to 2020-05-24 23:59:59 -05

#### Datos de medicion de la calidad del aire tomados con CalidAir



Date	CalidAir CO ppm(mean)	CalidAir NO2(mean)	CalidAir PM2.5ug(mean)	CalidAir PM 10 ug(mean)
2020-05-19 17:00:00	1.08	0.0	11.5	12.5
2020-05-19 18:00:00	1.4	0.01	11.67	12.67
2020-05-19 19:00:00	0.65	0.02	10.33	11.33
2020-05-19 20:00:00	0.66	0.02	13.83	14.83
2020-05-19 21:00:00	0.52	0.02	11.33	12.33
2020-05-19 22:00:00	0.49	0.02	11.17	12.17
2020-05-19 23:00:00	0.3	0.02	6.5	7.5
2020-05-20 00:00:00	0.17	0.02	5.17	6.17
2020-05-20 01:00:00	0.1	0.02	8.83	9.83
2020-05-20 02:00:00	0.11	0.03	12.0	13.0
2020-05-20 03:00:00	0.15	0.02	14.5	15.5
2020-05-20 04:00:00	0.3	0.02	22.83	24.17
2020-05-20 05:00:00	0.41	0.02	21.83	23.17
2020-05-20 06:00:00	0.67	0.02	24.0	25.67
2020-05-20 07:00:00	0.81	0.05	25.83	27.33
2020-05-20 08:00:00	0.31	0.06	12.67	13.67
2020-05-20 09:00:00	0.2	0.04	7.2	8.2

Figura C-2.: Reportes calidad del aire formato PDF.

Datos Calidad Air inmediaciones Portal Américas				Datos RMCAB estación Kennedy			Diferencias y RMSE de los datos comparados					
Date	CalidAir PM 2.5 (ug/m <sup>3</sup> )	CalidAir CO (ppm)	CalidAir NO2 (ppb)	CO (ppm)	NO2 (ppb)	PM 2.5 (ug/m <sup>3</sup> )	Dif PM 2.5	Dif CO	Dif NO2	RMSE PM 2.5	RMSE CO	RMSE NO2
2020-05-16 16:00:00	3.17	1.22	0.02	0	0.008	2	1.17	1.22	0.02	4.75322887	0.65020434	0.0821302
2020-05-16 17:00:00	2.93	0.96	0.02	1	0.006	6	-2.17	-0.44	0.02	4.73734674	0.63753203	0.0820393
2020-05-16 18:00:00	3	0.5	0.02	1	0.01	7	-4	-0.5	0.01	4.80830203	0.64098503	0.0837598
2020-05-16 19:00:00	4.5	4.38	0.04	1	0.04	7	-2.5	3.38	0.026	4.82004067	0.64217523	0.0847392
2020-05-16 20:00:00	4.17	0.72	0.04	1	0.05	0	4.17	-0.28	0.025	4.84837692	0.64453663	0.0832722
2020-05-16 21:00:00	4.93	0.94	0.02	1	0.03	0	4.93	-0.65	0.007	4.95070351	0.49717466	0.0819745
2020-05-16 22:00:00	3.5	0.24	0.02	0	0.013	6	-2.5	0.24	0.007	4.859180496	0.48377784	0.0832621
2020-05-16 23:00:00	2.5	0.12	0.02	0	0.011	9	-6.5	0.12	0.009	4.889366012	0.48685259	0.0845832
2020-05-17 0:00:00	2.17	0.34	0.02	0	0.009	0	2.17	0.34	0.011	4.856914907	0.490778762	0.08857928
2020-05-17 1:00:00	2.33	0.05	0.02	0	0.007	0	2.33	0.05	0.013	4.890695946	0.493012579	0.08684628
2020-05-17 2:00:00	2.5	0.01	0.02	0	0.006	7	-4.5	0.01	0.014	4.824538231	0.497350121	0.08770703
2020-05-17 3:00:00	2	0.01	0.02	0	0.006	6	-4	0.01	0.014	4.83181859	0.501843307	0.08846268
2020-05-17 4:00:00	1.33	0.02	0.02	0	0.007	1	0.33	0.02	0.013	4.94752452	0.506472396	0.08824318
2020-05-17 5:00:00	2.5	0.09	0.02	0	0.01	3	-0.5	0.09	0.01	4.933772346	0.510212553	0.08903653
2020-05-17 6:00:00	2.5	0.22	0.02	1	0.012	1	1.5	-0.78	0.008	5.041053904	0.519582506	0.09190216
2020-05-17 7:00:00	3.5	0.23	0.02	0	0.01	5	-1.5	0.23	0.01	5.05833098	0.509419123	0.09304576
2020-05-17 8:00:00	1.67	0.13	0.07	0	0.006	8	-6.33	0.13	0.064	5.12156272	0.514358859	0.09445308
2020-05-17 9:00:00	2.67	0.08	0.03	0	0.006	3	-0.33	0.08	0.024	5.10473467	0.516239195	0.09738162
2020-05-17 10:00:00	2.67	0.1	0.03	0	0.005	4	-1.33	0.1	0.025	5.157465463	0.523553406	0.09722039
2020-05-17 11:00:00	3	0.78	0.02	0	0.006	1	2	0.78	0.014	5.20843585	0.528923033	0.09706263
2020-05-17 12:00:00	8.33	1.76	0.02	1	0.006	5	3.33	0.76	0.014	5.25847878	0.522125672	0.09707937
2020-05-17 13:00:00	3.33	0.06	0.02	0	0.007	6	-2.67	0.06	0.013	5.29122506	0.519594587	0.09713002
2020-05-17 14:00:00	3.5	0.2	0.02	0	0.008	0	3.5	0.2	0.012	5.335956292	0.520862484	0.09722049
2020-05-17 15:00:00	3	0.14	0.02	0	0.007	3	0	0.14	0.013	5.371191241	0.526000707	0.09732193
2020-05-17 16:00:00	3.67	0.3	0.02	0	0.008	6	-2.33	0.3	0.012	5.434787847	0.537078793	0.09741049
2020-05-17 17:00:00	2	0.02	0.02	0	0.01	2	-4	0.02	0.01	5.480583623	0.536230285	0.09752493
2020-05-17 20:00:00	4.5	0.25	0.05	1	0.012	6	-1.5	-0.75	0.038	5.520661192	0.542842058	0.09767194
2020-05-17 21:00:00	4.33	0.16	0.08	0	0.012	4	0.33	0.16	0.068	5.55882314	0.536479502	0.09830322
2020-05-17 22:00:00	4.33	0.1	0.07	0	0.013	3	1.33	0.1	0.057	5.658586395	0.542872477	0.09800012
2020-05-17 23:00:00	2.33	0.06	0.02	0	0.014	4	-1.67	0.06	0.006	5.72032487	0.549313998	0.09835954
2020-05-18 0:00:00	2.67	0.02	0.02	0	0.01	5	-2.33	0.02	0.01	5.80275529	0.557409694	0.09833839
2020-05-18 1:00:00	2.67	0.01	0.02	0	0.01	5	-2.33	0.01	0.01	5.67875626	0.565306491	0.09831652
2020-05-18 2:00:00	1.83	0	0.02	0	0.006	8	-6.17	0	0.014	5.344185246	0.573557013	0.09828793
2020-05-18 3:00:00	2.67	0.01	0.02	0	0.007	7	-4.33	0.01	0.013	5.37230302	0.582162414	0.09815421
2020-05-18 4:00:00	3.33	0.14	0.02	1	0.013	2	1.33	-0.86	0.007	5.980477876	0.591206394	0.09866853
2020-05-18 5:00:00	5.17	0.32	0.02	1	0.022	2	3.17	-0.68	-0.002	6.077474286	0.580465998	0.09902267
2020-05-18 6:00:00	5.33	0.48	0.02	1	0.022	4	1.33	-0.52	-0.002	6.144638689	0.576953534	0.09916591
2020-05-18 7:00:00	5.17	0.51	0.02	1	0.026	7	-1.83	-0.49	-0.006	6.244801976	0.578174339	0.09931401
2020-05-18 8:00:00	3.17	0.22	0.02	1	0.022	17	-13.83	-0.78	-0.002	6.345821556	0.581622555	0.09941239
2020-05-18 9:00:00	3.17	0.2	0.02	1	0.019	14	-10.83	-0.8	0.001	5.88818287	0.57236623	0.09976205
2020-05-18 10:00:00	3.17	0.11	0.02	1	0.015	13	-9.83	-0.89	0.005	5.612562489	0.562408967	0.09975689
2020-05-18 11:00:00	4	0.28	0.02	1	0.013	11	-7	-0.72	0.007	5.375475421	0.545223559	0.09989495
2020-05-18 12:00:00	4	0.2	0.02	1	0.012	10	-6	-0.8	0.008	5.296355778	0.536710651	0.09900283
2020-05-18 13:00:00	5	0.23	0	1	0.011	7	-2	-0.77	-0.011	5.264290695	0.522260971	0.09808014
2020-05-18 14:00:00	3.33	0.25	0	1	0.011	7	-3.67	-0.75	-0.011	5.265688128	0.50813833	0.09803828
2020-05-18 15:00:00	3.93	0.23	0.02	1	0.013	0	-4.17	-0.77	0.007	5.413235803	0.493674271	0.09838085
2020-05-18 16:00:00	4.5	0.75	0.02	1	0.012	7	-2.5	-0.25	0.008	5.488786751	0.479562696	0.09819346
2020-05-18 17:00:00	5.33	0.46	0.02	1	0.013	10	-4.67	-0.54	0.007	5.602033594	0.484637683	0.09821351
2020-05-18 18:00:00	5.67	0.53	0.02	1	0.018	11	-5.33	-0.47	0.002	5.649369188	0.481175344	0.09836281
2020-05-18 19:00:00	6.67	0.65	0.02	1	0.021	9	0.67	-0.35	-0.001	5.667535195	0.482023612	0.09852257
2020-05-18 20:00:00	9.93	0.47	0.02	1	0.023	15	-9.07	-0.53	-0.003	5.83862167	0.48906328	0.09877249
2020-05-18 21:00:00	8.83	0.34	0.02	1	0.023	16	-7.17	-0.66	-0.003	5.887353678	0.486257819	0.09830762
2020-05-18 22:00:00	7.41	0.16	0.02	1	0.023	16	-8.99	-0.84	-0.003	5.78486387	0.474003674	0.09880264
2020-05-18 23:00:00	16.33	0.13	0.02	0	0.023	16	0.33	0.13	-0.003	5.910249102	0.439060972	0.09802552
2020-05-19 0:00:00	15.33	0.06	0.02	0	0.021	11	4.33	0.06	-0.001	5.734457981	0.444650199	0.09855639
2020-05-19 1:00:00	13	0	0.01	0	0.01	13	0	0	-0.007	5.845427117	0.465637393	0.09831141
2020-05-19 2:00:00	11	0.25	0	0	0.016	12	-1	0.25	-0.016	6.130735682	0.48836468	0.09837203
2020-05-19 3:00:00	10	0.15	0	0	0.017	10	0	0.15	-0.017	6.453730306	0.50793688	0.09827472
2020-05-19 4:00:00	16	0.05	0	0	0.019	16	0	0.05	-0.019	6.845248526	0.536180295	0.09823832
2020-05-19 5:00:00	13.75	0.53	0	0	0.018	16	-2.25	0.53	-0.018	7.37876351	0.572898982	0.09836489
2020-05-19 6:00:00	12.83	0.81	0	1	0.021	13	-0.17	-0.19	-0.021	7.880684962	0.579741322	0.09809805
2020-05-19 7:00:00	9.5	0.42	0.01	1	0.021	17	-8.5	-0.59	-0.011	8.598625573	0.623084759	0.09844077
2020-05-19 8:00:00	4.33	0.36	0.02	1	0.022	18	-13.67	-0.64	-0.002	8.62435215	0.64111235	0.09835834

Figura C-3.: Comparación de datos de medición de calidad del aire.

# Bibliografía

- [1] AGE, Environmental P.: Air Quality Index Report. (2016)
- [2] ALPHASENSE AIR. <http://www.alphasense.com/index.php/air/products//>
- [3] AUTODESK. <https://www.autodesk.com/products/eagle/free-download>
- [4] CHENGDU EBYTE ELECTRONIC. <https://www.cdebyte.com>
- [5] DIYMODULES. <http://www.diymodules.org/eagle-search>
- [6] DOMINGUEZ, A.Cobos: , Diseño e implementación de una arquitectura IoT basada en tecnologías Open Source, Ingeniería Telemática. (2016)
- [7] EAN, Universidad: Laboratorio ambiental móvil para mediciones de la calidad del aire en tiempo real. (2019)
- [8] G. PARMAR, S. L. ; CHATTOPADHYAY, M. K.: An IoT based low cost air pollution monitoring system. En: *international Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE), Bhopal* (2017)
- [9] GEEKFACTORY. <https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/ds1307-en-tiny>
- [10] HONEYWELL. <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-particulate-hpm-series-a>
- [11] IDREES, Zou Z. Zheng L.: Edge Computing Based IoT Architecture for Low Cost Air Pollution Monitoring Systems. En: *A Comprehensive System Analysis, Design Considerations Development Sensors* (2018)
- [12] KIRUTHIKA, R. ; UMAMAKESWARI, A.: Low cost pollution control and air quality monitoring system using Raspberry Pi for Internet of Things. En: *International Conference on Energy, Communication, Data Analytic and Soft Computing (ICECDS), Chennai, 2017, pp. 2319-2326* (2017)
- [13] KUMAR, S. ; JASUJA, A.: Air quality monitoring system based on IoT using Raspberry Pi. En: *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, 2017, pp. 1341-1346.* (2017)
- [14] LORA WAN. <https://lorawan.es/>

- 
- [15] MACHADO, Calderón C. A. Moreno L. P: PROPUESTA DE ARQUITECTURA PARA INTERNET DE LAS COSAS. En: *Tesis de grado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana* (2016)
- [16] MACTRONICA. <https://www.mactronica.com.co/modulo-lectura-escritura-micro-sd-ard>
- [17] NAYLAMPECHATRONICS. <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-conve>
- [18] ORGANIZATION, World H.: Calidad del Aire OMS. (2018)
- [19] PROGRAMOERGOSUM. <https://www.programoergosum.com/cursos-online/raspberry-pi/23>
- [20] SECRETARIA DE AMBIENTE. <http://ambientebogota.gov.co/estaciones-rmcab//>
- [21] TDROBOTICA. <http://tdrobotica.co/convertidor-de-nivel-logico-bi-direccional/347.h>
- [22] UBIDOTS CALIDAIR. <http://www.calidaircol.iot.ubidots.com//>
- [23] WILLIAMS, Kilaru V. Snyder E. Kaufman A. Dye T. Rutter A. Hafner H.: Air sensor guidebook. En: *US Environmental Protection Agency*. (2014)
- [24] XACATACA. <https://www.xacataca.com>